



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUUSO SALONEN

**ERISTETYN MUOTTIHARKKOSEINÄN LASKENNALLINEN MITOITUS
KUORMITUSKOKEIDEN PERUSTEELLA**

Diplomityö

Tarkastaja: Prof. Ralf Lindberg

Tarkastaja ja aihe hyväksytty

Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekunnan tiedekuntaneuvoston ko-
kouksessa 09.10.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

JUUSO SALONEN: Eristetyn muottiharkkoseinän laskennallinen mitoitus kuormitusko-
keiden perusteella

Diplomityö, 47 sivua, 13 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Prof. Ralf Lindberg, DI Juha Valjus, DI Seppo Petrow

Avainsanat: Muottiharkko, rakenteellinen mitoitus, elementtimenetelmä, kokeellinen mitoi-
tus

Tarve tälle työlle ilmeni, kun Rakennusteollisuus RT tilasi VTT:ltä kuormituskokeen, jos-
sa kuormitettiin eristettyjä muottiharkkoseiniä epäkeskeiselle puristukselle ja puristuksen
ja taivutuksen yhdistelmälle. Kokeissa huomattiin rakenteissa olevan paljon ylimääraistä
varmuutta. Tämän työn tarkoitus oli luoda luotettava laskentamalli, joka toimisi kuormi-
tuskokeiden havaintojen mukaisesti. Jo työn alussa huomattiin, että erillisillä yksinker-
taisilla laskentamalleilla molemmat kuormitustavat saadaan laskettua hyvin. Suuremman
työn takana oli luoda yksi laskentamalli, jolla saadaan ratkaistua molemmat kuormitusta-
paukset, eli joka toimii myös kuormitusten yhdistelyyn.

Työn painoarvo oli koko ajan laskennassa, jota hiottiin työn loppuun asti. Ongelmia
aiheuttivat mm. betonin ja betoniterästen yhteistoiminnan kuvaaminen, eristeen materiaa-
liominaisuudet sekä ohjelmistolliset rajoitteet. Lopullinen laskentamalli on edellämait-
tujen kompromissi, joka täyttää työlle asetetut tavoitteet ja on jalostettavissa työkaluksi
oikeiden harkkorakenteiden mitoitukseen. Betonin ja terästen yhteistoiminta kuvattiin lo-
pullisessa laskentamallissa teräksen ympärille mallinnetulla heikennetyllä alueella, joka
salli teräksen ottaa voimia betonin menetettyä vetolujuutensa. Käytetyn ohjelman lisens-
siehtojen takia aivan kaikkia kyseisen ohjelman ominaisuuksia ei työssä saatu käytet-
tyä, mutta lopulta käytössä ollut lisenssi osoittautui riittäväksi laskentamallin luomiseksi.
Eristeen materiaaliominaisuudet osoittautuivat kuitenkin lopulta suurimmaksi ongelmak-
si työn tekemisessä niiden suuren vaihtelun takia. Lopulliset tulokset laskettiin eristeen
arvoilla, jotka saatiin muuttamalla niitä kunnes tulokset vastasivat kuormitusten tuloksia.

Lopulta malli saatiin toimimaan halutusti, ja yhdellä mallilla saatiin laskettua molem-
mat kuormitustapaukset. Suurimmaksi epävarmuudeksi jäi eristeen materiaaliominaisuu-
det, kuten edellisessä kappaleessa todettiin. Lopulta todettiin, että harkkojen väliin on
syytä asentaa esimerkiksi teräksiä, jotka siirtävät kuormaa kuorelta toiselle. Jos kuorma
halutaan siirtää pelkästään eristeellä, on eristeen ominaisuuksia huononnettava riittävän
varmuuden saamiseksi niin paljon, että eristeen antama hyöty analyysiin muuttunee lähes
merkityksettömäksi. Tämän työn tuloksista huomattiin kuitenkin se, että toisen kuoren
mukaan ottaminen analyysin on ehdottomasti kannattavaa rakenteen kestävyuden kannal-
ta. Työn jälkeen on tarkoitus aloittaa mitoitusohjeiden laskenta, joka perustuu tässä työs-
sä luotuun laskentamalliin. Jotta nyt luotua malli voidaan hyödyntää mitoituksessa, täytyy
täytyy ratkaista se, miten se saadaan luotettavasti tehtyä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Building Technology

JUUSO SALONEN: Analysis of stackable heat-insulating hollow block wall according to loading tests performed to a real size structure

Master of Science Thesis, 47 pages, 13 Appendix pages

December 2013

Major:

Examiner: Prof. Ralf Lindberg, M.Sc. (Tech.) Juha Valjus, M.Sc. (Tech.) Seppo Petrow

Keywords: Hollow block, structural analysis, finite element method, experimental analysis

The need for this thesis appeared when Confederation of Finnish Construction Industries RT ordered loading test of real size stackable heat-insulating hollow block wall from VTT. The walls were loaded in two different ways; one with eccentrically applied compressive force and one with continuous lateral load and compressive load. It was shown in these loadings, that there is a lot of extra certainty in these kind of structures. The purpose of this works is to create a working analysis model for these structures, with which can both loading types be calculated. When both loading types can be calculated with one model, there is a possibility to calculate different kinks of loadings.

The main focus of this thesis has been in analysis. Biggest problems were faced with the analysis of concrete and rebars, material properties of insulation and software limitations. The final analysis model is a compromise of the previous that fulfills the objective of this Thesis. The model constructed can also be processed in to a model that can be used in analysing real block structures. The united action of concrete and rebars was modeled in the final analysis model with weakened area of concrete around the rebar. The weakening allowed rebars some force after the concretes tension yield strength was reached. Because of licensing terms of the analysis program all of the features in the program could not be used, but in the end the license that was used proved to be proficient to the task in hand. Material properties of the insulation used ended up to be the biggest problem in the analysis because big variation of the properties. Final results were analysed with insulations material properties that were determined by fixing them so, that the results matched the results of the performed loadings.

In the end the model worked the way it was supposed and both loading scenarios could be calculated with one analysis model. The biggest uncertainty ended up being the material properties of the insulation, as stated before. For future preference it was stated that for example there should be rebars installed between the hollow block shells. These rebars would transfer loads from shell to shell. If loads are transferred solely through insulation the material properties of the insulation should be weakened to gain enough certainty on the bearing load of the structure. After these weakenings the benefit of the insulation could end up being meaningless. This thesis clearly showed that analysing the whole heat-insulating hollow block is definitely profitable, it only needs to be studied how it can be done in a reliably way.

ALKUSANAT

Tämän työn tekeminen alkoi alkuvuonna 2013 ja viimeiset korjaukset työhön tehtiin saman vuoden lokakuussa. Ensimmäiset viikot menivät työn tekemiseen valitun laskentaohjelmaan Ansykseen tutustuessa ja ensimmäisistä tuloksista oli pitkä matka lopulliseen laskentamalliin. Suurin osa työajasta meni laskentaan ja työn kirjoittaminen aloitettiin vasta loppukesästä, kun laskentamalli alkoi olla lopullisessa muodossaan. Työn rahoittaja oli Rakennusteollisuus RTT Ry:n Betoniteollisuus ja Suomen Betoniyhdistys. Tilat ja välineet työhön sain työnantajaltani Finnmap Consulting Oy:ltä Lahden konttorista. Haluankin kiittää kaikkia edellä mainittuja yrityksiä työn tekemisen mahdollistamisesta. Erityiskiitos työtä ohjanneille Juha Valjukselle, Seppo Petrowille ja Ralf Lindbergille. Lisäksi haluan kiittää yhteistyöstä Lammin Betoni Oy:tä ja heidän erittäin avuliasta yhteishenkilöään Markus Inkiläistä.

Työn alkuvaiheessa sain paljon apua Ansyksen kanssa KPM-Engineering Oy:n teknisen laskennan osaston johtajalta Ville Laineelta. Kiitän Villeä, sillä hänen apunsa Ansyksen kanssa oli korvaamatonta. Haluan myös kiittää koko Lahden toimiston työyhteisöäni motivoimisestani, erityisesti toimistopäällikkömme Timo Pekkinen ja kirjojaan avuliaasti lainannut Jukka Hyry ansaitsevat erityiskiitokseni.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni tuesta ja voimavaroista, joita olen heiltä saanut tähän työhön ja koulun suorittamiseen yleisesti. Kiitos vaimoni Johanna ja poikamme Niilo ja Eino. Kiitos tuesta kaikessa myös vanhemmilleni ja appivanhemmilleni, erityisesti Annelle työni oikoluvusta.

Lahdessa 14.10.2013

Juuso Salonen

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Teoria	3
2.1 Lujuusoppi	3
2.1.1 Epäkeskeisesti puristetun sauvan ratkaisu	4
2.1.2 Poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitetun, aksiaalisesti puristetun sauvan ratkaisu	5
2.2 Materiaalit	7
2.3 Nykyiset mitoitusmenetelmät	10
2.3.1 BY-202 lisäepäkeskisyyden laskenta	13
2.4 Laskentaohjelman valinta ja sen rajoitukset	13
3. VTT:n tekemät kuormituskokeet	15
3.1 Kuormitusten esittely	15
3.2 Materiaalikokeet	15
3.3 Kuormituskokeet	16
4. Rakenteen lujuuslaskenta	23
4.1 Perinteinen lujuuslaskenta	23
4.2 FEM-mallin luominen	24
4.3 Laskentamallin optimoiminen vastaamaan tuloksia	30
5. Tulokset	32
6. Tulosten tarkastelu	34
7. Yhteenveto	37
Lähteet	39
A. Liitteitä	40

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

EPS

EPS on paisutettua polystyreenimuovia (expanded polystyrene), jota käytetään kestävyytensä ja lämmöneristävyytensä ansiosta laajasti rakennusteollisuudessa ja rakentamisessa. Lämmöneristeessä muoviraaka-aineen määrä on noin 2...5 % levyjen tilavuudesta. [7]

Epälineaarinen laskenta

Epälineaarisessa laskennassa otetaan huomioon se, miten rakenne ja materiaaliominaisuudet muuttuvat laskennan aikana. Esimerkiksi toisen kertaluvun momentti rakenteen taipuessa tai materiaalin plastisoituminen tietyllä jännityksen arvolla.

FEM

Finite Element Method, eli elementtimenetelmä. Matemaattinen menetelmä, jossa analysoitava asia jaetaan pieniin käsiteltäviin osiin, jotka muodostavat ratkaistavan kokonaisuuden. [9]

Muottiharkko

Ladottavia muottiharkkoja käytetään lujuutta, tiiviyyttä ja ääneneristävyttä vaativissa rakenteissa, kuten perustukset, maanpaineseinät, osastoivat seinät sekä maatilarakentamisessa. Muottiharkot ladotaan päällekkäin ilman muurausta ja seinä vataan betonilla täyteen. [3] Muottiharkkoja tehdään myös eristettyinä, jolloin harkon muodostaa tyypillisesti sisäkuori, eriste ja ulkokuori.

VTT

Teknologian tutkimuskeskus. www.vtt.fi

ϵ_i Venymä, eli $\Delta L/L_0$

ω mekaaninen raudoitusuhde, eli $A_s f_{yd}/A_c f_{cd}$

KUVAT

2.1	Epäkeskeisesti puristettu sauva [11]	4
2.2	Poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitettu, aksiaalisesti puristettu sauva [11]	6
2.3	Harjateräksen venymä-jännityskuvaaja	8
2.4	Puristetun betonin venymä-jännityskuvaaja	9
2.5	Vedetyn betonin venymä-jännityskuvaaja	9
2.6	EPS-eristeen venymä-jännityskuvaaja	10
2.7	Molemmista päistään nivelöidyn puristussauvan taipuma ja poikkileikkauksen käyritys. [8]	13
3.1	Kuvat kuormitetuista koekappaleista [13]	18
3.2	VTT:n raportin pohjalta uudelleen piirretty kuvaaja taivutetusta ja puristetusta rakenteesta (Kuormitustapaus 1)	19
3.3	VTT:n raportin pohjalta uudelleen piirretty kuvaaja epäkeskeisesti puristetusta rakenteesta (Kuormitustapaus 2)	19
3.4	Kuva harkkoseinästä ennen valua. Kuvasta on laskettavissa 6 terästä. <i>Kuva saatu työssä käytettäväksi Lammin Betoni Oy:ltä</i>	20
3.5	Kuva harkkoseinästä ennen valua. Syy kuuden teräksen käyttämiseen oli onteloiden sijainneissa koekappaleessa. <i>Kuva saatu työssä käytettäväksi Lammin Betoni Oy:ltä</i>	21
3.6	Kuvat kuormitustapauksesta 1 [13]	21
3.7	Kuvat kuormitustapauksesta 2 [13]	22
4.1	Erilliset laskentamallit taivutetulle ja puristetulle rakenteelle	26
4.2	Laskentamallien yhdistäminen yhdeksi harkkomalliksi ja sen jalostaminen lopulliseksi malliksi	27
4.3	Laskentaverkko ylhäältä katsottuna	28
4.4	Laskentaverkko sivusta katsottuna	29
4.5	Eristeen ominaisuuksien optimoinnin vaiheita	30
5.1	Taivutetun ja puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja. Kuvaaja suurempana liitteessä 4.	32
5.2	Puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja. Kuvaaja suurempana liitteessä 5.	33

- 6.1 Taipuma-voima -kuvaaja kun kuorma on sisäkuorella ja eristeillä on materiaalivalmistajan arvot. Vertailuviivana tulos, jossa kuorma on ulkokuorella kuten kuormituskokeissa ja eristeillä on lujat, tulosten perusteella arvioidut arvot 35
- 6.2 Taipuma-voima -kuvaaja kun kuormitus suoritettiin ns. väärin päin olevalle rakenteelle, eli teräkset olivat enemmän puristus- kuin vetopuolella. Eristeenä materiaalivalmistajan mukainen eriste. 36

1. JOHDANTO

VTT:llä kuormitettiin muottiharkkoseiniä murtoon kahdella eri kuormitustavalla. Tämän työn tarkoituksena on yrittää päästä laskennallisesti simuloimalla mahdollisimman samalla tavalla käyttäytyvään harkkoseinärakenteeseen kuin mitä oikeasti kuormitetut rakenteet VTT:n kuormituskokeissa käyttäytyivät. Tarve työlle ilmeni vasta tehtyjen kuormitusten jälkeen, kun huomattiin rakenteiden kestävän paljon enemmän kuin mitä nykyiset laskentaohjeen rakenteille sallivat. Työn tarkoituksena on mahdollistaa muun muassa korkeiden, pelkän tuulikuorman kuormittamien seinien rakentamisen. Nykyisillä laskentamenetelmillä seinä lasketaan niin hoikaksi, ettei se kestä kovinkaan korkeana rakenteena. Hoikkuus johtuu siitä, että harkkoseinän toimivaa poikkileikkausta redusoidaan vahvasti siten, että jäljelle jää pelkästään harkon sisälle valettava betoni, ja pieni osa harkon kuoresta.

Tässä työssä saatuja tuloksia on tarkoitus hyödyntää työn jälkeen laskettaessa mitoitusohjeita suunnittelijoille. Nyt ei kuitenkaan ole tarkoitus käydä läpi muuta kuin laskennan yhteensovittamista todellisiin kuormituksiin, eli työssä ei käsitellä muunlaisilla rakenteilla ilmeneviä ongelmia, jotka liittyvät rakenteen lujuuslaskentaan (kuten pitkäaikaiskestävyys, viruma, varmuusluvut tai muut sellaiset ilmiöt, jotka eivät ilmenneet kuormituskokeissa).

Työn yhteydessä toteutettiin vierailu Lammin betonin tehtaalla. Vierailun tarkoituksena oli tutustua muottiharkon valmistusmenetelmään ja saada tuotteesta hyvä yleiskuva. Tässä kappaleessa esitellään Lammin betonin toimintaa ja heidän muottiharkon valmistusprosessiaan tehdasvierailun perusteella. Vierailun kohteeksi valittiin Lammin betoni, koska VTT:llä kuormitetut muottiharkkoseinät (kappale 3) olivat Lammin betonin valmistamia.

Lammin betoni Oy on vuonna 1956 perustettu perheyrittys jonka toimipaikka on Lammilla. Yritys työllistää 48 henkilöä ja sen liikevaihto vuonna 2010 oli 12,5 miljoonaa euroa. [10]

Lammin betonin harkkotehtaalla on oma betoniasema, jossa harkkoissa käytettävä betoni valmistetaan. Kiviaines betoniin tulee läheisiltä soramontuilta. Harkkojen valmistus

tapahtuu pääsääntöisesti koneellisesti ja työntekijät toimivat laadunvalvojina ja koneiden ohjaajina. Koska koko tuotantolinja on automatisoitu, ovat harkot erittäin tasalaatuisia. Tuotannon yhteydessä jokaisen tuotantoerän harkoille tehdään mm. taivutusvastuskoe ja eristeharkoille koe, jonka avulla mitataan se voima, jolla eriste irtaana kuoresta.

2. TEORIA

Teoriaosuudessa käydään läpin työn kannalta oleellisia teorioita. Materiaalien ominaisuudet ja niiden mallintaminen osoittautuivat odotetusti yhdeksi suurimmista haasteista työn aikana, ja lopullisen laskentamallin materiaalmallien taustat on selitetty kappaleessa 2.2. Lisäksi käydään läpi tulevassa rakentamismääräyskokoelman osassa B9 esitetty harkkorakenteiden mitoitusmenetelmä, jolla saatuja tuloksia verrataan kuormituskokeiden ja laskennan tuloksiin luvussa 6. Lopuksi käydään läpi laskentaohjelman valintaan vaikuttaneita, FEM-teoriaan kohdistuneita vaatimuksia.

2.1 Lujuusoppi

VTT kuormitti muottiharkkoseinän kahdella eri tavalla testatessaan rakenteen kapasiteettia. Lisätietoa tehdyistä kuormituksista ja niiden tuloksista löytyy kappaleesta 3. Tehdyt kuormitukset vastasivat stabiliteetin menettämisen kannalta kahta tyypillistä nurjahdustapaa: epäkeskeisesti puristettua sauvaa ja poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitettua, aksiaalisesti puristettua sauvaa. [11]

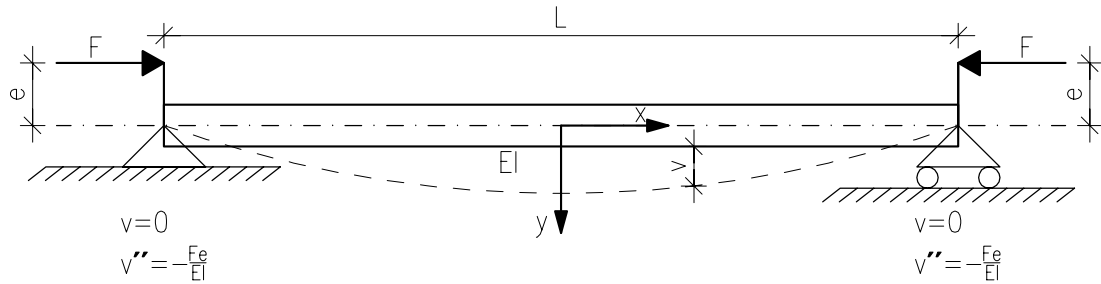
Molemmat kuormitustavat siis päättyivät rakenteen stabiliteetin menettämiseen nurjahdusmuodossa. Erkki Pennala kuvaa kirjassaan lujuusopin perusteet nurjahdusta seuraavasti: "Kuormitettaessa sauvaa aksiaalisesti vallitsee sauvan jokaisessa kohdassa tietty puristusjännitys. Tällöin kuorman ja jokaisessa leikkauksessa vallitsevan sisäisen aksiaalisen resultanttivoiman välillä on tasapainotila. Sauvan akseli pysyy suorana. Jos sauvaa nyt kuormitetaan pienellä poikittaisvoimalla, se taipuu voiman suunnassa ja sauvan akseli on käyrä. Jos sauvan akseli palaa poikittaisvoiman poistamisen jälkeen suoraksi, on sauvan akselin suora tila vakaa eli stabiili.

Kasvatettaessa sauvan aksiaalikuormaa havaitaan erään kriittisen kuorman ylittymisen jälkeen, että sauva taipuu sivulle päin. Jokaisessa sauvan leikkauksessa on nyt tietty normaalivoima ja taivutusmomentti, jotka yhdessä pitävät kuorman tasapainossa. Sauvan akseli on nyt käyrä ja sen tila on epämääräinen. Kuorman suhteen sauva on epästabiilissa tilassa. Kuvattu ilmiö on nimeltään nurjahdus. Jos sauvaa sekä puristetaan että taivutetaan, on kyseessä ns. nurjahdustaivutus." [11]

Kappaleen 3.1 kuormitustapaus yksi vastaa edellä mainittua poikittaisesti tasanjakau-

tuneesti kuormitettua, aksiaalisesti puristettua sauvaa ja kuormitustapaus kaksi epäkeskeisesti puristettua sauvaa. Kappaleissa 2.1.1 ja 2.1.2 on esitetty ratkaisut molemmille tapauksille. Tapausten havainnekuvat on esitetty edellämainituissa kappaleissa kuvissa 2.1 sekä 2.2. ([11] 9.2.1 ja 9.2.4)

2.1.1 Epäkeskeisesti puristetun sauvan ratkaisu



Kuva 2.1: Epäkeskeisesti puristettu sauva [11]

Sallitun puristusvoiman ratkaistu kuten se on esitetty lähteessä [11]:

Nurjahduksen differentiaaliyhtälön ratkaisusta

$$v = C_1 + C_2x + C_3 \cos(kx) + C_4 \sin(kx) \quad (2.1)$$

saamme reunaehdot sijoittamalla (origo palkin keskellä)

$$\begin{aligned} C_1 - C_2 \frac{L}{2} + C_3 \cos \frac{kL}{2} - C_4 \sin \frac{kL}{2} &= 0 \\ C_2 \frac{L}{2} + C_3 \cos \frac{kL}{2} + C_4 \sin \frac{kL}{2} &= 0 \\ -k^2 C_3 \cos \frac{kL}{2} + k^2 C_4 \sin \frac{kL}{2} &= -\frac{Fe}{EI} \\ -k^2 C_3 \cos \frac{kL}{2} - k^2 C_4 \sin \frac{kL}{2} &= -\frac{Fe}{EI} \end{aligned} \quad (2.2)$$

josta ratkaisut arvot ovat:

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{Fe}{k^2 EI} & C_2 &= 0 \\ C_3 &= \frac{Fe}{k^2 EI} \frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} & C_4 &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

kun $k^2 = \frac{F}{EI}$, niin taipuman lausekkeeksi saadaan sijoittamalla ratkaisu 2.3 nurjahduk-

sen differentiaaliyhtälön lausekkeeseen 2.1:

$$v = -e + e^{\frac{\cos kx}{\cos \frac{kL}{2}}} \quad (2.4)$$

ja taipuma jännevälin keskellä on

$$v(0) = e \left(\frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Maksimimomentti esiintyy keskikohdassa ja sen lauseke on

$$M_{max} = F[e + v(0)] = Fe \frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} \quad (2.6)$$

jolloin suurin normaalijännitys on

$$\sigma_{max} = -\frac{F}{A} - \frac{Fe \frac{h}{2}}{Ai^2} \frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} \quad (2.7)$$

missä $h/2$ on reunaetäisyys taivutustasossa ja i on jäyhyys säde. Sallittu puristusvoima, jos materiaalin sallittu puristusjännitys on σ_{psall} , on

$$F_{sall} = -\frac{\sigma_{sall}A}{eh \frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} + \frac{1}{2i^2}} \quad (2.8)$$

Koska kaavassa 4.1 esiintyy F molemmilla puolilla (F sisältyy myös k :hon), ratkaisua ei saada suoraan, vaan se on haettava iteroimalla.

2.1.2 Poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitetun, aksiaalisesti puristetun sauvan ratkaisu

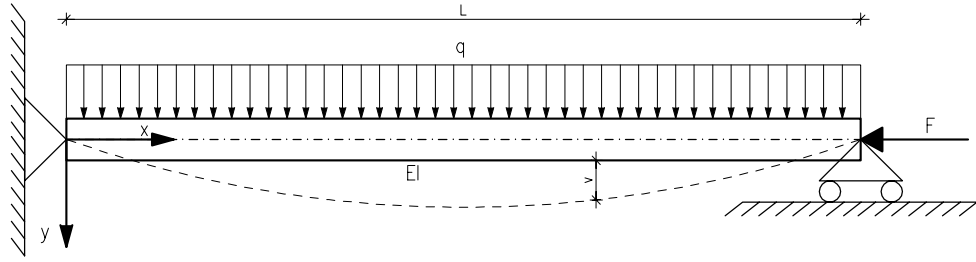
Taipuman suurin arvo ratkaistu kuten se on esitetty lähteessä [11] ja siitä laskettu suurin tasaisen kuorman sallittu arvo vakiopuristusvoimalla:

Taivutusmomentti kuvan 2.2 mukaisen sauvan mielivaltaisessa kohdassa x on

$$M = Fv + \frac{qLx}{2} - \frac{qx^2}{2} \quad (2.9)$$

Sijoittamalla kaava 2.9 kimmoviivan differentiaaliyhtälöön ja käyttämällä merkintää $k^2 = F/EI$ saadaan

$$v'' + k^2v = \frac{qk^2x^2}{2F} - \frac{qLk^2x}{2F} \quad (2.10)$$



Kuva 2.2: Poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitettu, aksiaalisesti puristettu sauva [11]

jonka ratkaisu on muotoa

$$v = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + \frac{qx^2}{2F} - \frac{qLx}{2F} - \frac{q}{k^2F} \quad (2.11)$$

Reunaehdosta $v(0) = 0$ seuraa, että $C_2 = q/k^2F$. Ehdosta $v(L) = 0$ saadaan

$$0 = C_1 \sin kl + \frac{q}{k^2F} \cos kl - \frac{q}{k^2F} \quad (2.12)$$

mistä

$$C_1 = \frac{q}{k^2F} \tan \frac{kl}{2} \quad (2.13)$$

Taipuman lauseke on siten

$$v = \frac{q}{k^2F} \left(\tan \frac{kl}{2} \sin kx + \cos kx \right) + \frac{qx^2}{2F} - \frac{qLx}{2F} - \frac{q}{k^2F} \quad (2.14)$$

Taipuman ja taivutusmomentin suurimmat arvot keskikohdassa ovat

$$v_{max} = \frac{q}{k^2F} \left(\frac{1}{\cos \frac{kl}{2}} - 1 \right) - \frac{qL^2}{8F} \quad (2.15)$$

$$M_{max} = \frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{\cos \frac{kl}{2}} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Maksimimomentista saadaan laskettua suurin jännitystila

$$\sigma_{max} = -\frac{F}{A} - \frac{M_{max} \frac{h}{2}}{Ai^2} = -\frac{F}{A} - \frac{h}{2Ai^2} \frac{q}{k} \left(\frac{1}{\cos \frac{kl}{2}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

missä $h/2$ on reunaetäisyys taivutustasossa ja i on jäyhyyssäde. Sallittu tasainen kuorma, jos materiaalin sallittu puristusjännitys on σ_{psall} , on

$$q_{sall} = -\frac{2Ai^2k^2(\sigma_{sall} - \frac{F}{A})}{h\left(\frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} - 1\right)} \quad (2.18)$$

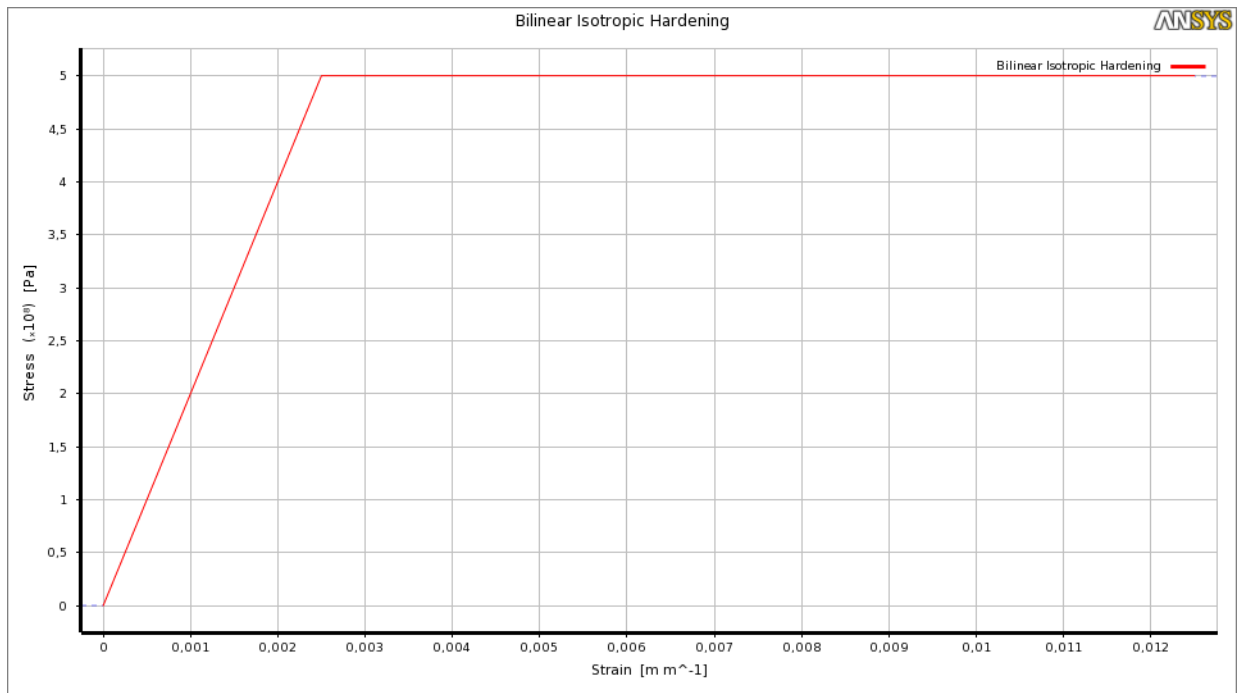
2.2 Materiaalit

Lopullisessa laskentamallissa käytettiin neljää eri materiaalimallia, jotka oli tarkoitettu puristetulle betonille, vedetylle betonille, harjateräkselle sekä eristeelle. Materiaalimallien oli oltava epälineaarisia, jotta mallilla saataisiin kuvattua rakenteen murtokuormaa. Ennen työtä oli selvää, että betonin mallintaminen on vaikeaa, mutta työhön ryhdyttiin, koska mallinnettava rakenne on geometrialtaan ja betonin käyttäytymisen osalta yksinkertainen. Lopulta rakenteen murtumista päädyttiin kuvamaan sillä, että materiaalit plastisoituvat kun niiden murtojännitys ylittyy. Plastisoitumisen jälkeen niiden kimmokerroin menee lähelle nollaa ja ne eivät sido enempää energiaa systeemistä. Todellisen kaltaista murtumista ei ryhdytty mallintamaan, vaan pyrittiin kompromissien avulla saamaan aikaiseksi laskentamalli, joka antaa riittävällä tarkkuudella oikeita tuloksia, ratkeaa siedettävässä ajassa ja ylipäättään ratkeaa.

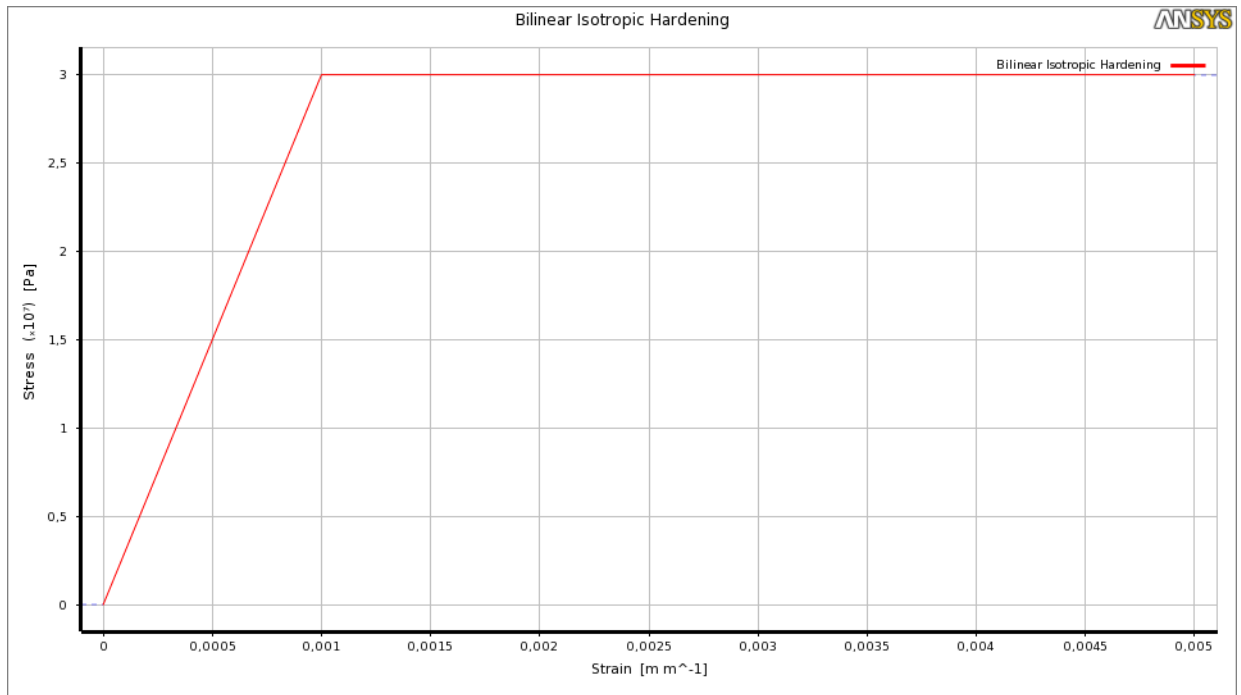
Käytetyt materiaaliominaisuudet on listattu taulukkoon 2.1. Betonin materiaaliominaisuudet on määritetty VTT:n kuormitusten yhteydessä tehtyjen betonin puristuskokeiden perusteella [13]. Harjateräksen materiaaliominaisuuksina käytettiin muuten normaalin rakenneteräksen ominaisuuksia, vain teräksen myötöjännityksenä käytettiin harjateräsmerkinnän (A500HW) mukaista jännitystä [2]. Eristeen ominaisuuksien määrittäminen osoittautui hankalimmaksi, sillä siitä ei löydy tietoa näin lyhyellä kuormitusajalla ja laskennan tulosten perusteella EPS:n lujuudeksi ja kimmokertoimeksi voidaan olettaa melko paljon suuremmat arvot kuin dokumentoidut arvot kertovat. Vertailukohtana käytettiin Thermisolien eristeiden materiaaliominaisuuksia, jotka on esitetty liitteessä 3 *THERMISOL EPS-ERISTEIDEN TEKNISET OMINAISUUDET* [5]. Kuormitettujen seinien harkoissa ei ollut Thermisolien EPS-eristettä, mutta käytetyn eristeen toimittajalta ei löytynyt materiaalin mekaanisista ominaisuuksista tarkempia tietoja, joten päätettiin käyttää Thermisolien arvoja, jotka oletetaan tarkkuudeltaan olevan riittävän lähellä käytetyn eristeen ominaisuuksia. Lopulta eristeen ominaisuuksilla ei ollut väliä, koska ilmoitetuista arvoista jouduttiin joka tapauksessa poikkeamaan, jotta tulokset saatiin täsmäämään kuormituskokeiden kanssa. Kuvissa 2.3, 2.4, 2.5 ja 2.6 on esitetty taulukon 2.1 materiaalien venymä-jännityskuvaajat.

Taulukko 2.1: Käytetyt materiaaliominaisuudet

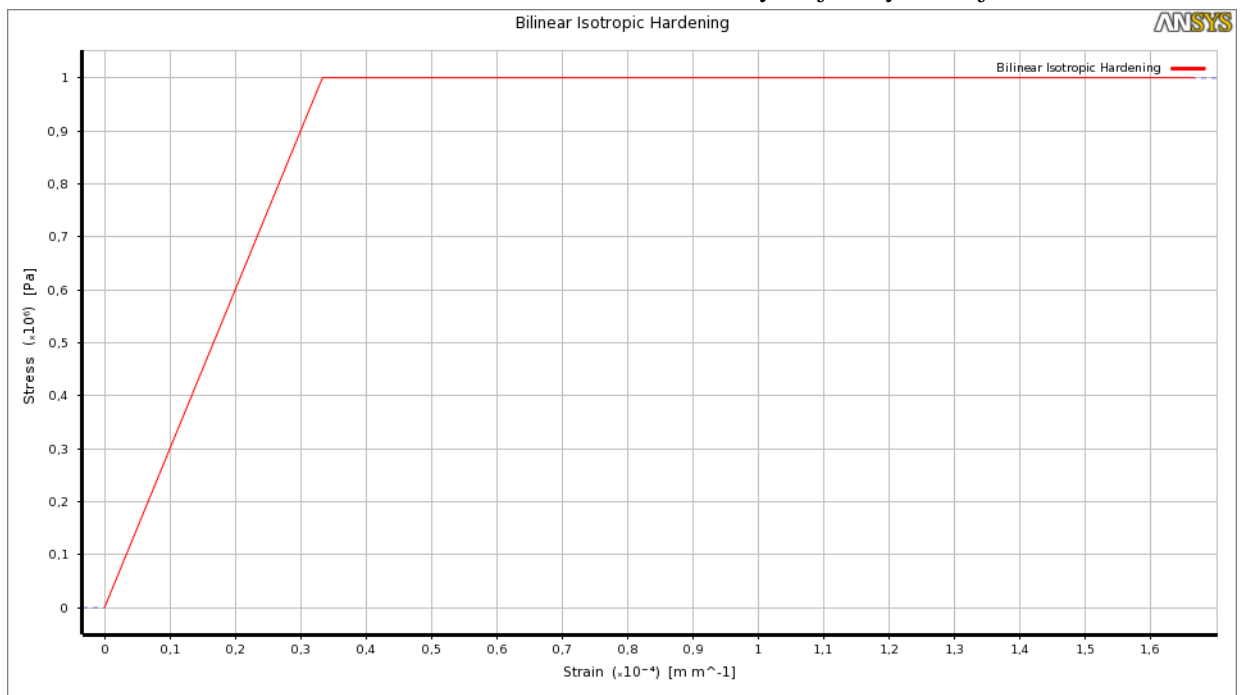
	Puristettu betoni	Vedetty betoni	Harjateräs	EPS-eriste (valmistaja)	EPS-eriste (lopullinen)
Tiheys [kg/m ³]	2300	2300	7850	950	950
Kimmokerroin [GPa]	30	30	200	10	30
Poissonin luku [-]	0,18	0,18	0,3	0,38	0,38
Puristuserroin [GPa]	15,625	15,625	166,67	0,013889	0,041667
Liukukerroin [GPa]	12,712	12,712	76,923	0,0036232	0,01087
Myötölujuus [MPa]	30	1	500	0,1	0,1



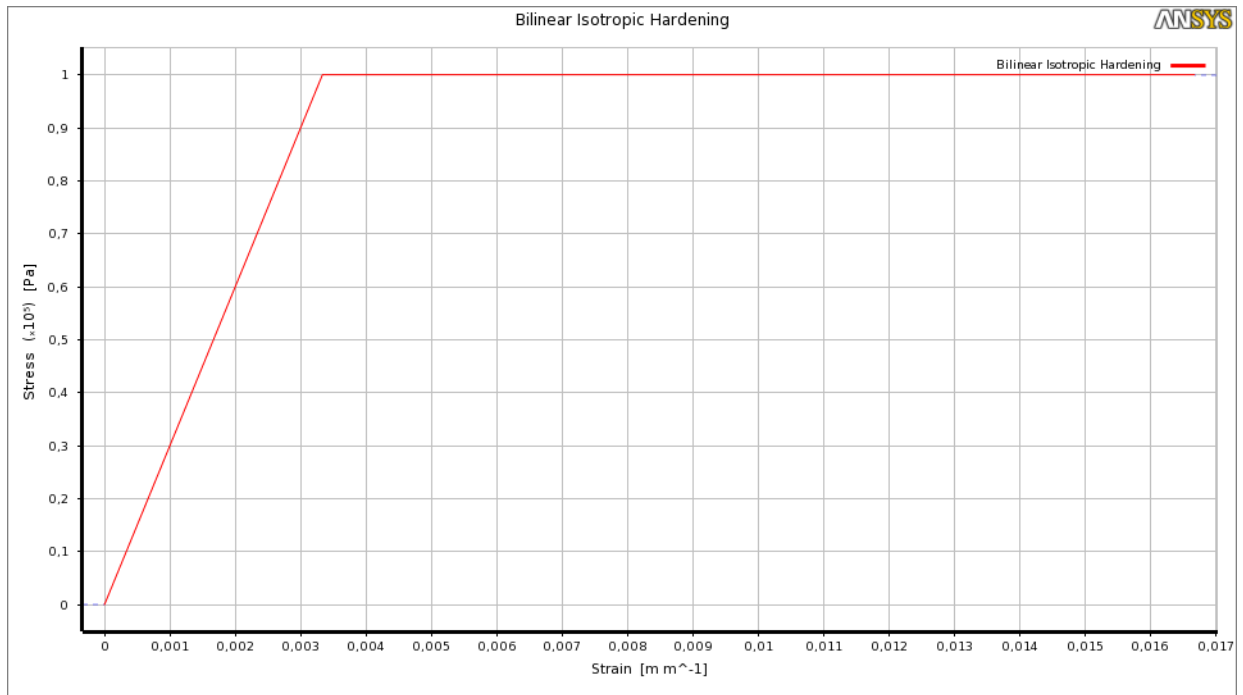
Kuva 2.3: Harjateräksen venymä-jännityskuvaaja



Kuva 2.4: Puristetun betonin venymä-jännityskuvaaja



Kuva 2.5: Vedetyn betonin venymä-jännityskuvaaja



Kuva 2.6: EPS-eristeen venymä-jännityskuvaaja

2.3 Nykyiset mitoitusmenetelmät

Työtä tehdessä oli käytössä ehdotusversio (päivätty 2.3.2011) RakMK B9 Muottiharkko-rakenteet ohjeesta. Työssä päädyttiin käyttämään ehdotusvaiheessa olevaa ohjetta, koska tiedettiin, että se on muuttumassa ja kyseinen versio oli jo melko pitkään valmisteltu, joten oli odotettavissa ettei se tule enää oleellisesti muuttumaan lopullisesta versiosta. Kysei-nen ohje koskee standardin SFS-EN 15435 mukaisia muottiharkkoja ja paikallavalettavaa normaalipainoista betonia käyttäen valmistettavien betonirakenteiden suunnittelua ja val-mistusta. [6]

Kappaleessa 6 esitellään myös B9:n mukaisesti lasketut lujuusarvot (Laskennat esillä myös liitteessä 6). Seuraavaksi käydään läpi laskennan vaiheet, joissa on koko ajan ole-tettu, että harkon kuivatiheys on suurempi kuin 2200 kg/m^3 (liitteen 1 perusteella tehty oletus). B9 antaa laskea puristuskestävyyden raudoittamattomana tai raudoitettuna. Rau-doittamattomana laskeminen jätettiin kokonaan tekemättä, koska sillä laskettu kapasiteet-ti on paljon alhaisempi kuin raudoitettun poikkileikkauksen. Raudoitettu poikkileikkaus voidaan B9:n mukaan mitoittaa soveltamalla standardin SFS-EN 1992-1-1 kohtaa 5.8.8., jossa kaavan 2.21 kaarevuus kerrotaan suhteella $(d/d_h)^2$, jossa d on tehollinen korkeus laskettuna betonivalun reunaan ja termi d_h tehollinen korkeus laskettuna muottiharkon reunaan. [6]

SFS-EN 1992-1-1 kohdassa 5.8.8 käydään läpi *Nimelliseen kaarevuuteen perustuva menetelmä*. Menetelmässä mitoitusmomentti lasketaan kaavan 2.19 mukaan. Kaavassa

2.19 oleva lisämomentti saadaan laskettua kaavan 2.20 mukaan. Lisämomentin e_2 , eli taipuma lasketaan kaarevuuden kautta (kaava 2.21). Kaarevuuteen vaikuttavat normaali-voiman suuruus (2.23), viruma (2.24), tehollinen korkeus ($1/r_0$) ja harkon mittasuhteet $((d/d_h)^2)$. [4]

Työtä tehdessä pyydettiin Eurokoodin tulkintaan apua kyseisen osan tekemiseen osallistuneelta Timo Tikanojalta ja hänen mielipiteensä oli, että SFS-EN 1992-1-1 kohta 5.8.8 ei sovellu vain vedetyltä sivulta raudoitettun rakenteen laskentaan, vaan käyritys pitäisi laskea BY202 mukaisella tavalla. Alla on esitelty SFS-EN mukainen laskentatapa ja kapaleessa 2.3.1 käydään läpi BY202:ssa esitelty laskentatapa.

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 \quad (2.19)$$

missä

M_{0Ed} on ensimmäisen kertaluvun analyysistä saatu momentti, jossa epätarkkuuksien vaikutus on mukana

M_2 on lisämomentti

$$M_2 = N_{Ed} e_2 \quad (2.20)$$

missä

N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo

e_2 on taipuma $= (1/r) l_0^2 / c$

$1/r$ on kaarevuus (katso kaava 2.21)

l_0 on nurjahduspituus

c on kokonaiskaarevuuden jakaumasta riippuva kerroin ¹

$$1/r = K_r \cdot K_\phi \cdot 1/r_0 \quad (2.21)$$

missä

K_r on korjauskerroin, joka riippuu normaalivoimasta, katso kaava 2.23

K_ϕ on kerroin jonka avulla otetaan huomioon viruminen, katso kaava 2.24

$$1/r_0 = \varepsilon_{yd} / (0,45d)$$

¹standardi antaa kaksi ehdotusta kokonaiskaarevuuden jakaumaan, joko sinimuotoinen kaarevuuden jakauma, jolloin arvo $c = 10 (\approx \pi^2)$ tai tasaisesti jakautunut kaarevuus, jolloin $c = 8$. Työn vertailuarvoja laskettaessa käytettiin arvoa 8, koska momenttipinta on epäkeskisyyden johdosta myös tasainen

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$$

d on tehollinen korkeus.² Jos raudoitus ei ole keskittynyt vastakkaisille puolille, vaan osa siitä on jakautunut yhdensuuntaisesti taivutustason kanssa, korkeudeksi d määritellään

$$d = (h/2) + i_s \quad (2.22)$$

i_s Epäsymmetrisen raudoituksen kokonaisalan jäyhyysäde. Tämä menetelmä ei kuitenkaan sovellu vain vedetyltä sivulta raudoitetun rakenteen kaarevuuden määrittämiseksi. Kyseisenlaisen rakenteen kaarevuus tulee määritellä BY202 mukaisesti lisäepäkeskisyydellä. [8] Lisätietoa kappaleessa 2.3.1.

$$K_r = (n_u - n)/(n_u - n_{bal}) \leq 1 \quad (2.23)$$

missä

$$n = N_{Ed}/(A_c F_{cd})$$

N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo

$$n_u = 1 + \omega$$

n_{bal} on suhteellisen normaalivoiman n arvo, kun taivutuskestävyydellä on maksimiarvo; arvoa 0,4 voi käyttää

$$\omega = A_s f_{yd}/(A_c f_{cd})$$

A_s on raudoituksen kokonaisala

A_c on betonipoikkileikkauksen ala²

$$K_\varphi = 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} \geq 1 \quad (2.24)$$

missä

φ_{ef} on virumisaste³

$$\beta = 0,35 + f_{ck}/200 - \lambda/150$$

λ on hoikkuusluku³

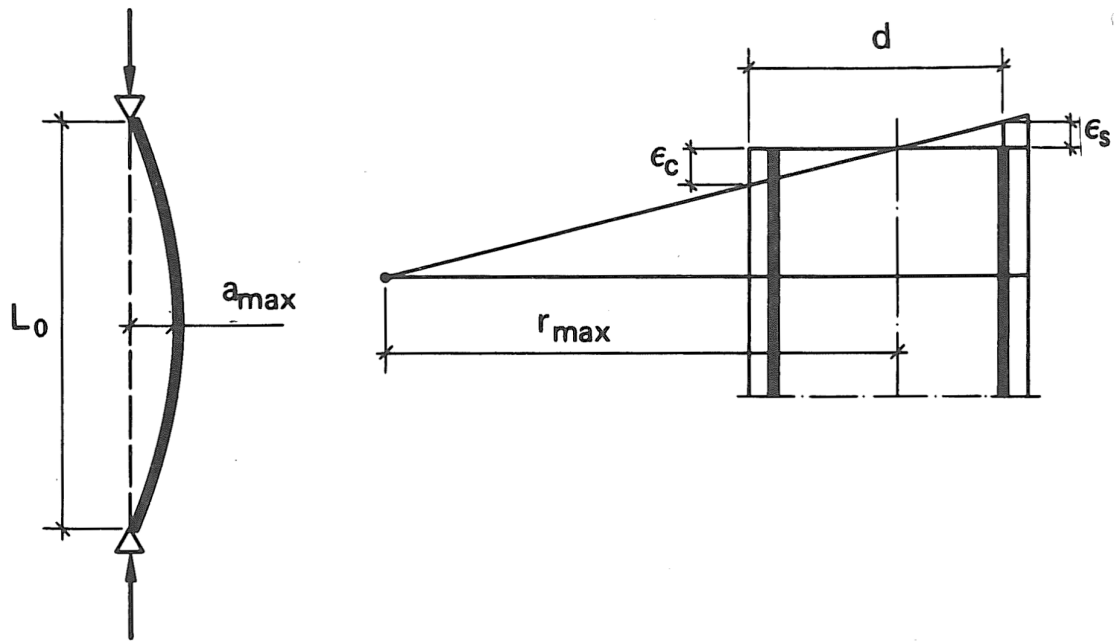
²koska harkkojen tehollinen korkeus otetaan huomioon kertomalla kaarevuus (kaava 2.21) suhteella $(d/d_h)^2$, käytetään tässä tehollista korkeutta muottiharkon reunaan

³virumaa ei tarkastella tässä tarkemmin koska kuormitukset joihin työn laskentaa verrataan olivat lyhytaikaisia. Kappaleen 6 tuloksissa on käytetty arvoa $K_\varphi = 0$. Lisätietoa viruman huomioimisesta löytyy standardista SFS-EN 1992-1-1

2.3.1 BY-202 lisäepäkeskisyyden laskenta

Koska eurokoodissa ei ole laskentatapaa vain toiselta sivulta raudoitettun poikkileikkauksen käyryyden laskentaan (katso kappale 2.3), täytyy sellaisen rakenteen käyryys laskea BY202 mukaisesti [8]. BY202 mukainen käyristymän laskenta perustuu kuvan 2.7 mukaiseen tilanteeseen, jossa poikkileikkaus myötää. Tällöin käyristys saa kriittisen arvonsa, jota voidaan siis käyttää normaalivoimaa laskettaessa kuten SFS-EN 1992-1-1 mukaista arvoa.

Suurin käyristys saadaan kaavan 2.25 mukaisesti



Kuva 2.7: Molemmista päistään nivelöidyn puristussauvan taipuma ja poikkileikkauksen käyristys. [8]

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\max} = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_y}{d} \quad (2.25)$$

missä

$$\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$$

$$\epsilon_y = f_{yd}/E_s$$

2.4 Laskentaohjelman valinta ja sen rajoitukset

Aivan työn alkuvaiheessa suoritettiin laskentaohjelman valinta, jotta sen käyttöä pääsisi opettelemaan ja itse työn laskenta saataisiin käyntiin mahdollisimman nopeasti. Koska mallinnettavan rakenteen geometria on melko yksinkertainen, olisi sen mallintaminen

saattanut onnistua myös 2-ulotteisena, mutta päädyttiin 3-ulotteiseen laskentaan, jotta raudoitus rakenteessa saataisiin toimimaan kuten oikeasti. 3-ulotteinen laskenta jättäisi myös mahdollisuuden mallintaa rakenne myöhemmässä vaiheessa neljältä sivulta tuettuna. Laskentaohjelman tuli myös mahdollistaa epälineaarinen laskenta ja epälineaariset materiaa-
limallit, jotta rakenteen nurjahtaminen ja materiaalien murtuminen saataisiin laskettua. Edellä mainituilla reunaehdoilla päädyttiin käyttämään Ansys Professional NLS (Non Linear Solver) versiota 13.0. Ansys valittiin lopulta siksi, että kyseinen lisenssi oli valmiiksi käytettävissä ja se sisälsi kaikki tarpeelliset ominaisuudet.

Elementtimenetelmä mahdollistaa huonosti rakenteen fyysisen hajoamisen, eli betonin halkeilua ei pysty mallintamaan⁴. Rakenteiden pettäminen mallinnettiin lopulta bilineaarisella plastisella mallilla, jonka kimmokerroin oli aluksi lineaarinen ja plastisoitui murtojännityksellä. Plastisoitumisen jälkeen materiaalin kimmokerroin oli lähellä nollaa (materiaalimallit esitelty tarkemmin kappaleessa 2.2). Plastisoitumista käyttämällä saatiin malli ratkeamaan helpommin kun tapahtumat kuormituksen aikana pysyivät maltillisina verrattuna siihen, että elementtiverkko olisi murtunut kuormituksen aikana. [1]

Ansys ei mahdollista materiaalille eri lujuusominaisuuksia saman akselin eri suuntiin, vaikka eri akseleille on mahdollista asettaa eri lujuusominaisuudet. Koska betonin veto- ja puristuslujuuksia ei saatu yhteen materiaalimalliin, täytyi molemmille tehdä omat mallit ja käyttää itse laskentamallissa kontakteja kuvaamaan betonin halkeilua. Lopullinen laskentamalli on esitelty kappaleessa 4.2.

⁴Ansyskessä on mahdollista käyttää Solid65 elementtiä, joka mahdollistaa betonin murtumisen ja halkeamisen, mutta se ei kuulu NLS-lisenssiin, joten sitä ei tässä työssä käytetty.

3. VTT:N TEKEMÄT KUORMITUSKOKEET

VTT teki kuormitukset kahdella erilaisella kuormitustavalla kuormitetulle eristemuottiharkkoseinälle. Kuormituksissa rakenteen vapaa väli oli 3 m ja seinän leveys 1 m. Harkkoina seinissä käytettiin Lammin betonin Lammi-lämpökivi LL400 eristeharkkoja (liite 1.). Liitteessä 2 on koekappaleiden valmistuskuvat. Tutkimustulokset on esitetty Rakenusteollisuus RT ry:n tilaamassa VTT:n raportissa MUOTTIHARKKOSEINÄN TESTAUS JA MATERIAALIEN LUJUUDEN MÄÄRITYS (tutkimusselostus Nro VTT-S-01949-12, lähde [13]).

3.1 Kuormitusten esittely

Kuormituksia tehtiin yhteensä kuusi kahdella eri kuormitustavalla. Molempia kuormitustapoja testattiin siis kolmella kuormituksella. Näiden lisäksi määritettiin betonin lujuus rakenteesta poratuista koekappaleista ja erikseen valetuista koekappaleista. Kuormitustapaukset olivat seuraavanlaiset [13]:

Kuormitustapaus 1 Puutalo

Kolme koekappaletta testattiin sisäkuoreen keskeisesti kohdistetulla puristavalla 30 kN normaalivoimalla ja taivutettiin murtoon. Taivutuskuormalla simuloitiin maanpaineesta johtuvaa kuormitusta. [13]

Kuormitustapaus 2 Kivitalo

Kolme koekappaletta testattiin sisäkuoreen 30 mm epäkeskeisesti kohdistetulla kuormituksella murtoon. Epäkeskisyydellä simuloitiin maanpaineesta johtuvaa kuormitusta tavoitteena kuormitustapauksen 2 aiheuttama kuormitus. Tällöin koe voitiin tehdä kuormituskoneella. Kokeessa 1 koekappaleen asennus oli päinvastainen koekeseen 2 ja 3 nähden. [13]

3.2 Materiaalikoheet

Rakenteesta sahattiin nimellismitaltaan 400 mm koekappaleita. Sahatuista koekappaleista ja vanerimuottiin valetuista vertailukoekappaleista määritettiin puristuslujuus, kuva 3.1.

Särmältään 150 mm betonikuutioista määritettiin betonin puristuslujuus standardin SFS-EN 12390-3 mukaan. [13]

Valettujen koekappaleiden tulokset esitetään taulukossa 3.1 ja Betonin puristuslujuus 150 mm:n kuutioista määritettynä esitetään taulukossa 3.2.

Taulukko 3.1: VTT:n kokeen koekappaleiden lujuuksia [13]

Vanerimuottiin valetut koekappaleet		
Tunnus	Tiheys kg/m ³	Lujuus MPa
1AV	2170	34,1
1BV	2180	35,8
1CV	2200	33,4
1DV	2180	32,8
2AV	2200	36,2
2BV	2220	31,6
2CV	2210	36,1
Sahatut koekappaleet		
Tunnus	Tiheys kg/m ³	Lujuus MPa
1AS	2250	33,7
1BS	2230	33,1
1CS	2220	33,0
1DS	2250	36,1
2AS	2220	32,1
2BS	2230	33,6
2CS	2230	34,2
2DS	2220	34,4

Huomattavaa puristuskokeiden tuloksissa on, että harkkoseinistä sahatut koekappaleet osoittautuivat yhtä lujiksi kuin valetutkin.

3.3 Kuormituskokeet

Kuormitettujen seinien valmistuskuvat on esitetty liitteessä 2. Valmistuskuvista poiketen muotteihin asennettiin kuusi kappaletta T10 harjateräksiä viiden kappaleen sijaan. Terästen määrä on nähtävissä kuvasta 3.4. Terästen määrää muutettiin ennen valua koska viisi terästä olisi ollut vaikea asetella harkkojen onteloihin (Kuva 3.5). Valokuvat kuormituksesta on esitetty kuvissa 3.6 ja 3.7.

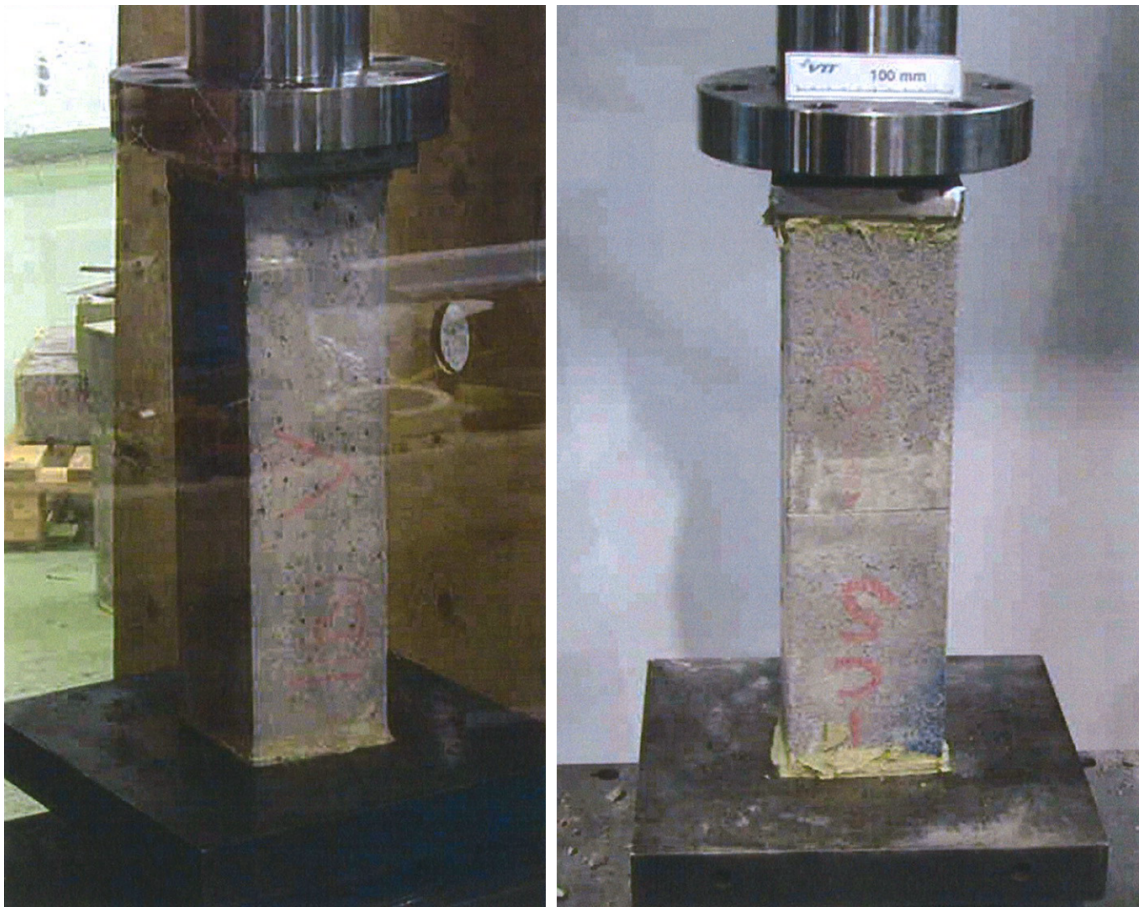
Epäkeskeisesti puristetuista koekappaleista kappale numero 1 kuormitettiin vahingossa

Taulukko 3.2: VTT:n kokeiden perusteella määritellyt betonin puristuslujuudet [13]

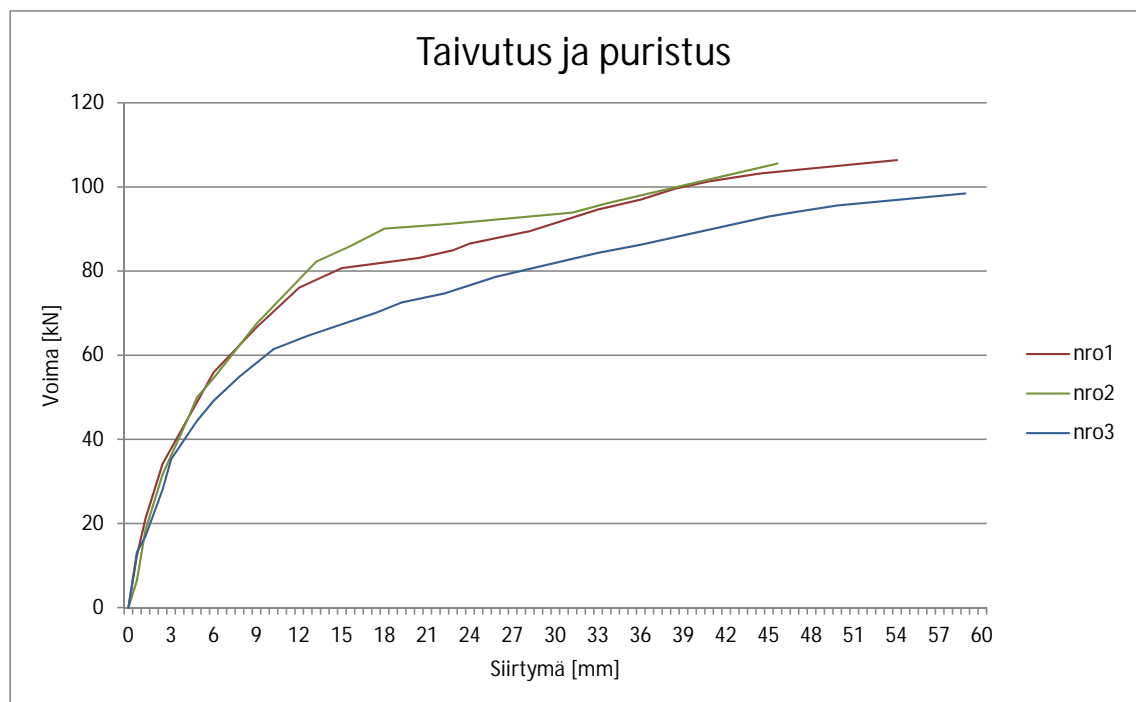
Tunnus	Ikä d	Tiheys kg/m ³	Lujuus MPa	Työ nro
L11 (16701)	42	2200	34,0	4431
L21.(16701)	42	2220	34,2	4441
L31 (16701)	42	2180	33,5	4451
L42 (16702)	42	2210	32,9	4461
L52 (16702)	42	2240	33,6	4471
L62(16702)	42	2170	32,2	4481
L7 (16890)	33	2350	46,0	4491
L8 (16890)	33	2350	44,5	4501
L9 (16890)	33	2360	47,7	4511

väärin päin, eli puristettavana olikin sisäkuoren sijaan ulkokuori ja vetoteräksiset sijoittuivatkin enemmän puristus, kuin vetopuolelle. Kuitenkaan kyseisen koekappaleen murto-kuorma ei jäänyt kuin noin 50 kN pienemmäksi kuin oikein päin kuormitettujen koekappaleiden. Virhe toistettiin laskennallisesti ja tuloksista löytyy lisätietoa kappaleessa 6. [13]

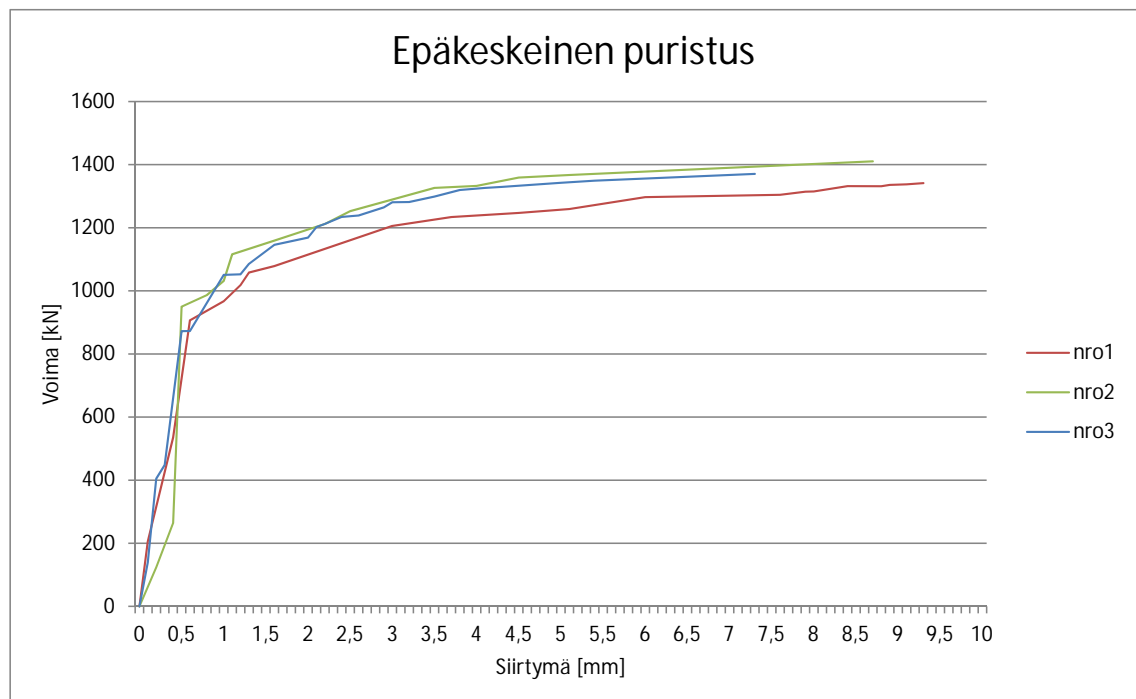
VTT:n kokeiden tulokset on nähtävillä kuvaajissa 3.2 ja 3.3. Myöhemmin samoihin kuvaajiin verrataan laskemalla saatuja arvoja.



Kuva 3.1: Kuvat kuormitetuista koekappaleista [13]



Kuva 3.2: VTT:n raportin pohjalta uudelleen piirretty kuvaaja taivutetusta ja puristetusta rakenteesta (Kuormitustapaus 1)



Kuva 3.3: VTT:n raportin pohjalta uudelleen piirretty kuvaaja epäkeskeisesti puristetusta rakenteesta (Kuormitustapaus 2)



Kuva 3.4: Kuva harkkoseinästä ennen valua. Kuvasta on laskettavissa 6 terästä. Kuva saatu työssä käytettäväksi Lammin Betoni Oy:ltä



Kuva 3.5: Kuva harkkoseinästä ennen valua. Syy kuuden teräksen käyttämiseen oli onteloiden sijainneissa koekappaleessa. Kuva saatu työssä käytettäväksi Lammin Betoni Oy:ltä



Kuva 3.6: Kuvat kuormitustapauksesta 1 [13]



Kuva 3.7: Kuvat kuormitustapauksesta 2 [13]

4. RAKENTEEN LUJUUSLASKENTA

Kuten kappaleessa 2.4 todettiin, päädyttiin rakenteen lujuuslaskenta tekemään Ansys Professional NLS 13.0 sovelluksella. Kappaleessa 2.2 esiteltiin käytetyt materiaalmallit ja kappaleessa 4.3 käsitellään miten niihin päädyttiin. Työn painopiste on koko ajan ollut laskentamallin tekemisessä ja siihen käytettiin myös eniten aikaa. Tarkoitus oli, että samalla laskentamallilla saataisiin tulokset vastaamaan molempia tehtyjä kuormituksia (kappale 3), jolloin kyseinen malli soveltuisi myös erilaisten kuormitusyhdistelmien laskentaan. Kuormitusyhdistelmät eivät kuitenkaan kuulu tämän työn laajuteen, vaan päämääränä nyt oli saada kehitettyä toimiva laskentamalli. Liitteessä 6 on laskettu minkälaisia kapasiteetteja rakenteelle saadaan normin mukaisella laskennalla ja kappaleessa 2.1 on laskettu perinteisemmän lujuuslaskennan mukaiset kestävyysarvot. Saatuja tuloksia verrataan myös normin mukaisiin kapasiteetteihin kappaleissa 5 ja 6.

4.1 Perinteinen lujuuslaskenta

Erkki Pennalan *Lujuusopin perusteet* -kirjasta löytyy analyyttiset ratkaisut rakenteille, jotka ovat lähes vastaavia VTT:llä tehtyjen kuormitusten kanssa. Epäkeskeisesti kuormitetun rakenteen sallittu puristusvoima on laskettavissa kaavasta 4.1, joka on johdettu kappaleessa 2.1.1. Samat rakenteet on esitetty myös Timoshenkon ja Geren kirjassa *Theory of Elastic Stability second edition*, Pennala on esittänyt ratkaisut hieman pidemmälle vietyinä joten tulevat kaavat viitataan häneltä. [12] [11]

$$F_{sall} = - \frac{\sigma_{sall} A}{1 + \frac{eh \frac{1}{\cos \frac{kL}{2}}}{2i^2}} \quad (4.1)$$

jossa

$$k^2 = \frac{F}{EI} \quad (4.2)$$

Poikittaisesti tasan jakautuneesti kuormitetun, aksiaalisesti puristetun sauvan sallittu poikittaiskuorma, kun normaalivoima on vakio, on laskettavissa kaavasta 4.3, joka on

johdettu kappaleessa 2.1.2.

$$q_{sall} = -\frac{2Ai^2k^2\left(\sigma_{sall} - \frac{F}{A}\right)}{h\left(\frac{1}{\cos\frac{kL}{2}} - 1\right)} \quad (4.3)$$

jossa k^2 on sama kuin kaavassa 4.1.

Taulukossa 4.1 on esitetty mitä kestävyysarvoja kaavoilla 4.1 ja 4.3 saadaan käytettäessä taulukossa esitettyjä laskenta-arvoja. Puristuksessa otaksuttiin, että sallittu jännitys betonilla on 30 MPa ja taivutuksessa samaan arvoon otaksuttiin arvio betonin vetolujuudesta (4 MPa). Iteraation jälkeen sallituksi puristusvoimaksi saatiin 1081,9 kN ja taivuttavaksi tasaisen kuorman arvoksi 20,38 kN/m, joka vastaa 3 metrin seinällä noin 61 kN voimaa¹. Raudoitusta tai betonin halkeilua ei tässä analyttiseen laskentamalliin perustuvassa tapauksessa pystytty huomioimaan, joten tulokset eivät ole vertailtavissa tämän työn muihin tuloksiin. Analyttisten tapausten tulokset antavat vain käsityksen siitä, että muut tulokset ovat oikeaa suuruusluokkaa ja helpottavat hahmottamaan rakenteen murto-mekanismia, eli nurjahtamista.

Taulukko 4.1: Käytetyt laskenta-arvot ja tulokset epäkeskeisesti puristetulle ja poikittaisesti tasanjakautuneesti kuormitetulle, aksiaalisesti puristetulle sauvalle

	Puristettu sauva	Taivutettu sauva	Yksikkö
σ_{sall}	30	4	MPa
h	120	120	mm
b	1000	1000	mm
A	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	mm ²
E	30	30	GPa
I	$1,44 \cdot 10^8$	$1,44 \cdot 10^8$	mm ⁴
i	34,641	34,641	mm
L	3	3	m
e	30	-	mm
k	0,017335491	0,002887	1/mm
F	1081,9	30	kN
q_{sall}	-	20,38	kN/m

4.2 FEM-mallin luominen

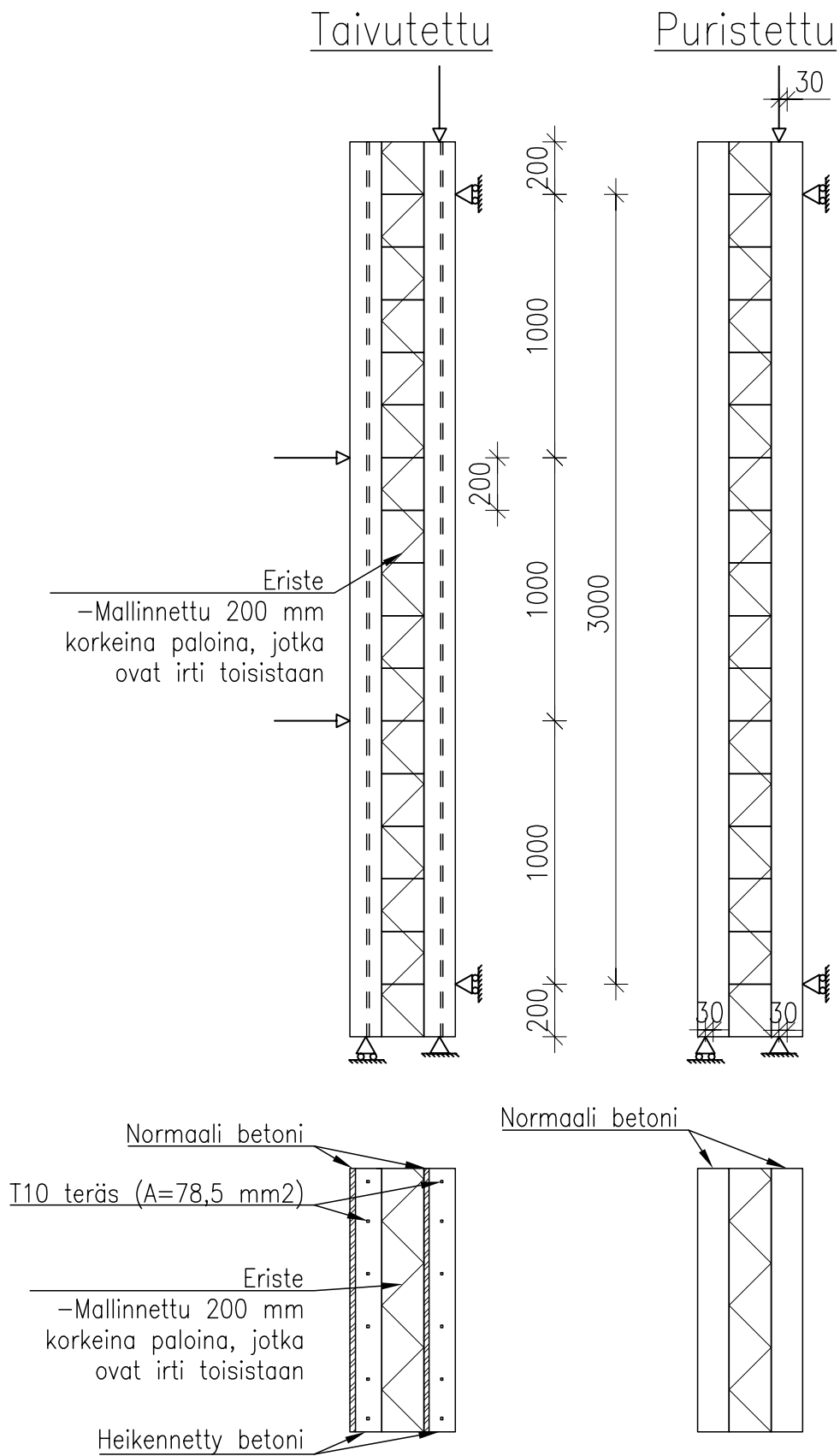
Mallin luominen aloitettiin tekemällä malli taivutetulle seinälle. Kaikki materiaalit mallinnettiin kimmo-plastisina, eli murtolujuuden ylittyttyä materiaali plastisoitui, jolloin kim-

¹VTT:n testissä yksinkertaistettiin tasainen kuorma kolmasosapisteisiin kohdistuviksi pistekuormiksi, joten tässä saatu arvo on vertailtavissa vain suuruusluokaltaan

mokerroin lähestyi nollaa. Betonin käyttäytyminen mallinnettiin siten, että poikkileikkausta heikennettiin siltä alueelta, jolta betoni menee laskennallisesti vedolle betonin vetolujuuden suuruiseksi arvoksi (4 MPa). Loput poikkileikkauksesta jäi betonin puristuslujuuden suuruiseksi (35 MPa). Rakenteeseen laitettiin teräksen niihin kohtiin, joihin ne todellisuudessaakin asetettiin. Teräkset mallinnettiin, kuten lopullisessakin mallissa, neliöinä, joiden poikkipinta-ala oli yhtä suuri kuin todellisen rakenteen pyöröharjateräksillä. Havainnekuva tästä mallista on esitetty kuvassa 4.1. Edellä kuvaillulla järjestelyllä malli antoi tulokseksi lähes täysin VTT:n kuormituskoetta vastanneen taipuma-voima kuvaajan ja tuloksia tutkimalla huomasi, että malli toimi kuten sen odotettiin toimivan.

Kun taivutettu malli saatiin toimimaan niin havaittiin, että samalla mallilla ei voida laskea epäkeskeisesti puristettua seinää. Suurin osa poikkileikkauksesta oli heikennetty vetolujuuden suuruiseksi, joten rakennetta puristettaessa heikennetty puoli antoi periksi ja rakenne nurjahti epäkeskisyyden suhteen väärään suuntaan. Kun heikennyksen muutti takaisin lujaksi betoniksi ja rakennetta kuormitti epäkeskeisesti, oli nurjahduskuorma hyvin lähellä oikeaa. Havainnekuva tästä mallista on esitetty kuvassa 4.1. Melko alkuvaiheessa työ saatiin siis jo siihen vaiheeseen, että molemmat kuormitustapaukset saatiin laskettua erillisillä malleilla sopivasti yksinkertaistaen. Luodut mallit eivät kuitenkaan ratkaisseet tutkimusongelmaa, eli sitä miten molemmat kuormitustapaukset saadaan laskettua yhdellä mallilla.

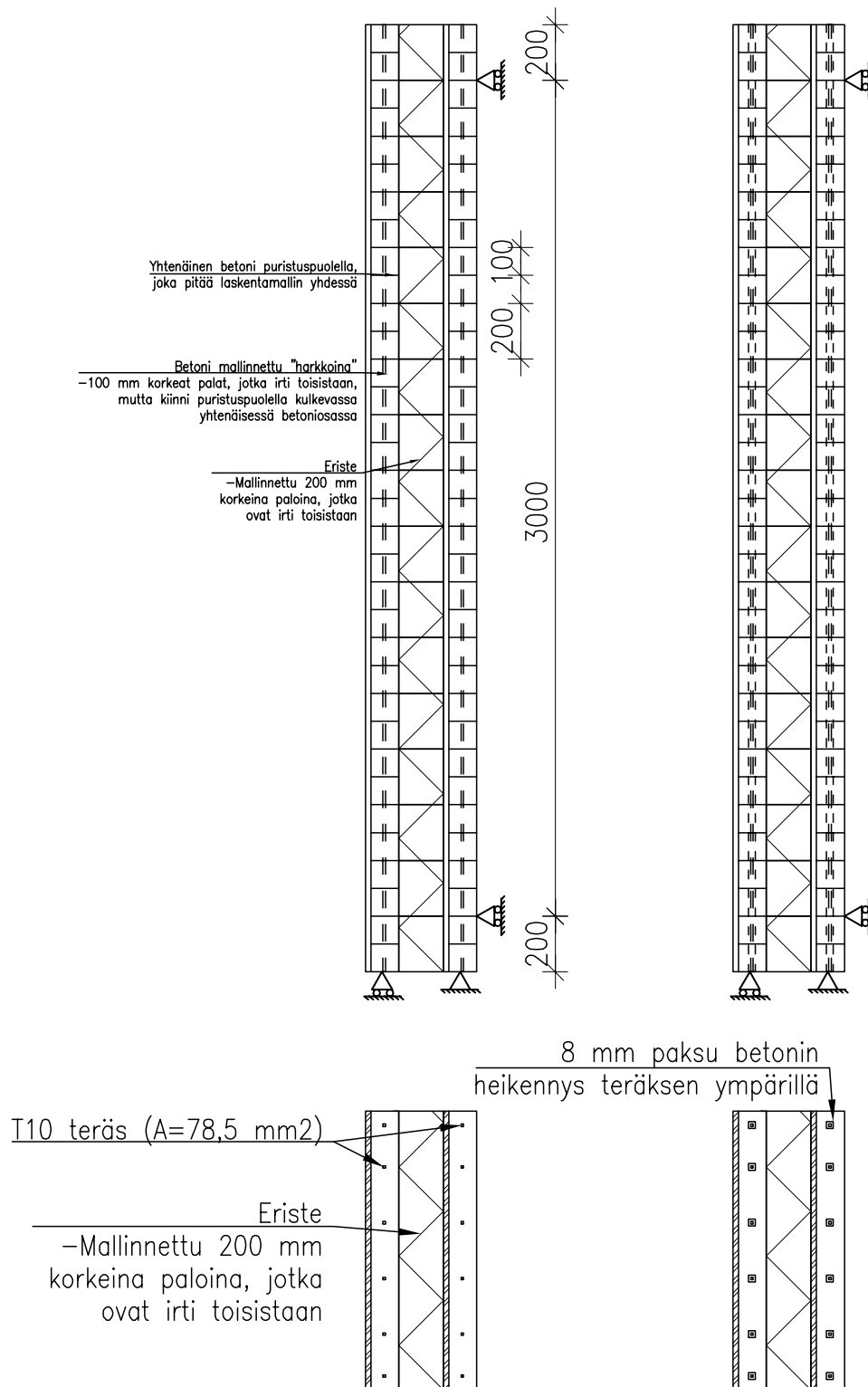
Molemmat kuormitustapaukset ratkaisevan mallin tulisi siis olla poikkileikkaukseltaan puristuslujuuden vahvuinen, jotta epäkeskeisesti puristettu malli toimisi kuten erillinen malli saatiin toimimaan. Puristuksen lisäksi mallin tulisi sallia betonin taivutuksessa vedolle menevän poikkileikkauksen murtumisen. Ratkaisu löytyi alkuperäisestä rakenteesta ja betoni päädyttiin mallintamaan harkkoina, jotka ovat irti toisistaan. Jotta malli pysyisi kuormitettaessa eheänä, laitettiin puristukselle menevän poikkileikkauksen puolelle kaistale ehjää betonia, johon harkko-osat kiinnitettiin. Harkkojen sisälle laitettiin teräkset kuten ensimmäisessä taivutusmallissa. Havainnekuva tästä mallista on esitetty kuvassa 4.2, harkkomalliksi nimettynä mallina. Kuormituksessa havaittiin kuitenkin, että taivutettu rakenne antoi suurempia kapasiteetteja kuin mitä odotettiin. Jännityksiä tarkasteltaessa huomattiin, että teräksissä kulkeva vetojännitys jakautui myös betonin sisään. Kun asiaa tutkittiin tarkemmin niin huomattiin, että koska betonin ja raudoituksen laskentasolmupisteet olivat samat harkkojen liitoksessa (eli ylemmän harkon alapinnan solmupiste joka on kiinni raudoituksessa on sama kuin alemman harkon yläpinnan kyseissä raudoitteen solmupisteessä oleva solmupiste), siirtyi vetovoima kyseisten solmujen kautta ja teräksille meni jännitystä vain sen verran mitä betonin ja teräksen kimmomodulien ero niille jätti. Yksinkertaisemmin sanottuna teräs ei siis päässyt venymään harkkojen välissä, koska harkkojen rajapinnassa oleva raudoitteen solmu oli kiinni molemmissa harkkoissa.



Kuva 4.1: Erilliset laskentamallit taivutetulle ja puristetulle rakenteelle

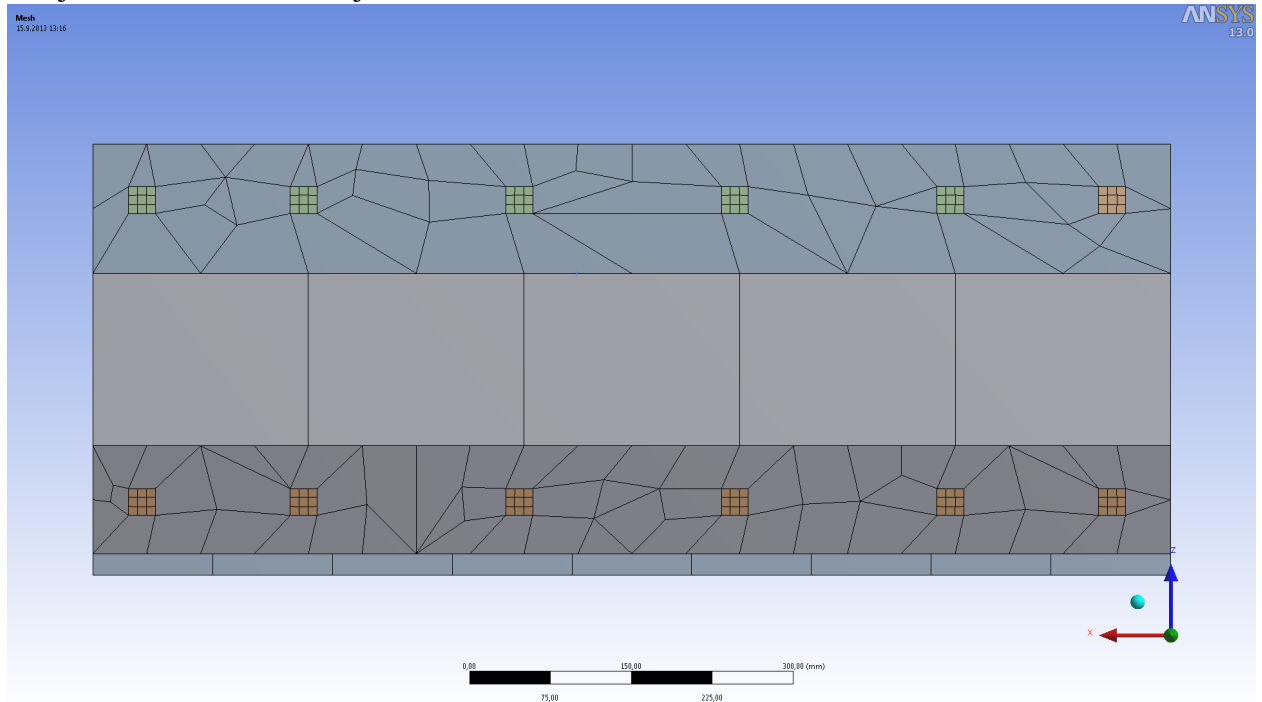
Harkkomalli

Lopullinen laskentamalli



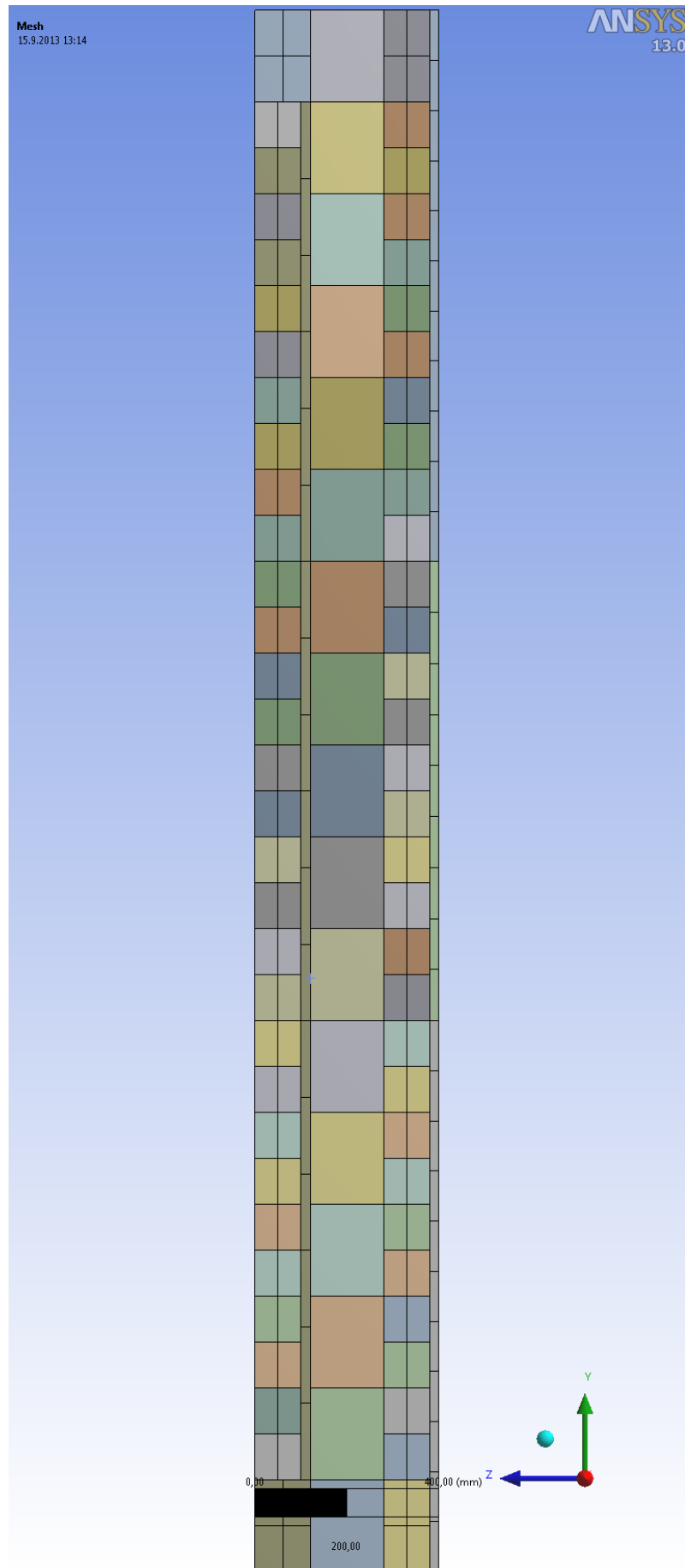
Kuva 4.2: Laskentamallien yhdistäminen yhdeksi harkkomalliksi ja sen jalostaminen lopulliseksi malliksi

Lopullinen laskentamalli muodostui edellisen kappaleen oivalluksesta. Teräksen ympärille asetettiin heikennetty betonin vyöhyke, jonka lujuus vastaa betonin vetolujuutta. Vyöhyke on sen verran pieni, että se ei vaikuta liikaa alentavasti puristuslujuuden tuloksiin, mutta sallii kuitenkin terästen ottaa vetoa ilman että sitä siirtyy betonille todellisuutta vastaavaa enempää. Periaatteessa heikennysvyöhyke kuvastaa siis myös raudoitteen tartuntaa betoniin betonin vetolujuuden lisäksi, varsinkin kun harkot pääsevät irtomaan toisistaan, jolloin todellista vetolujuutta betonissa ei ole ollenkaan.



Kuva 4.3: Laskentaverkko ylhäältä katsottuna

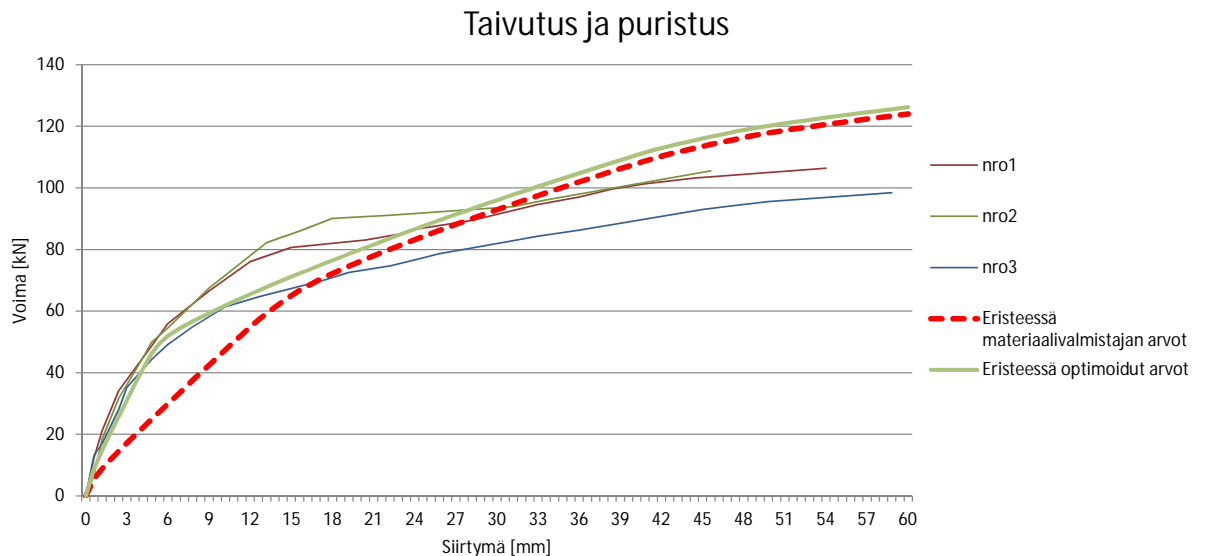
Kuvassa 4.3 on esitetty kuvakaappaus laskentaverkosta mallin päässä ja kuvassa 4.4 samasta mallista laskentaverkko sivusta. Kuvasta 4.3 näkee hyvin heikennysalueen teräksen ympärillä. Teräs mallinnettiin neliönä verkkottamisen helpottamiseksi ja lopullisessa mallissa päädyn verkko onkin melko hyvä. Aikaisemmat verkon versiot olivat melko tiheitä, mutta käytössä olleella tietokoneella mallin laskentaan meni silloin noin viikko. Lopullisella verkolla malli ratkeamiseen meni kuudesta kahdeksaan tuntia. Tiheän verkon tulokset poikkesivat lopullisen verkon tuloksista hyvin vähän, joten käytännön syistä päädyttiin käyttämään kevyempää verkkoa.



Kuva 4.4: Laskentaverkko sivusta katsottuna

4.3 Laskentamallin optimoiminen vastaamaan tuloksia

Kun laskentamalli saatiin lopulliseen muotoonsa (katso kappale 4.2 ja kuva 4.2), alkoi sen optimointi vastata VTT:n tuloksia. Alusta alkaen epäkeskeisesti puristettu malli oli antanut tasaisesti hyviä tuloksia ja suurimmat ongelmat olivat taivutetussa rakenteessa. Kun malli saatiin toimimaan kuten haluttiin, antoi se melko paljon alakanttiin olevia tuloksia (kuvassa 4.5 punainen katkoviiva kuvaaja).



Kuva 4.5: Eristeen ominaisuuksien optimoinnin vaiheita

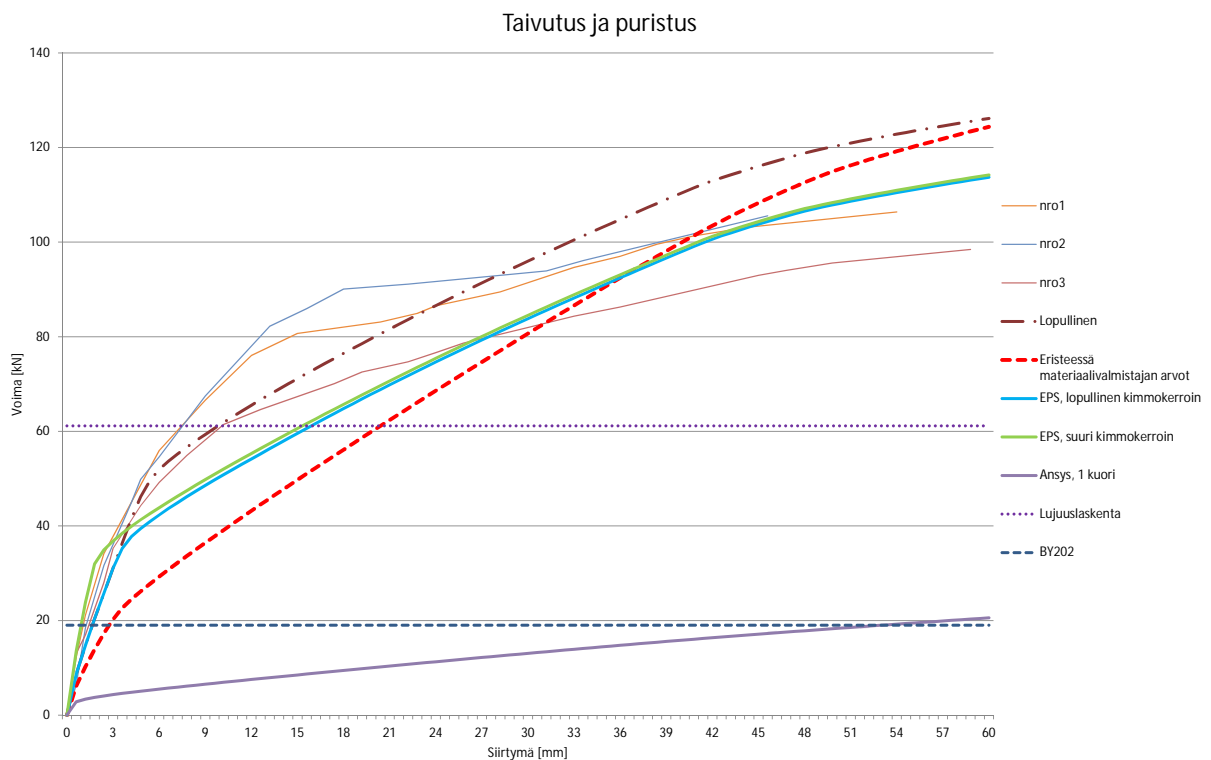
Kuten kuvasta 4.5 voidaan todeta, kasvoi siirtymä heti kuormituksen alettua paljon nopeammin kuin pitäisi. Ongelma johtui eristeen kimmokertoimesta. Kun kimmokerrointa nosti, sai siirtymäkuvaajan nousemaan samalla nopeudella kuin kuormituskokeissa. Tästä voitiin vetää johtopäätös siitä, että valmistajien eristeille ilmoittamat materiaaliarvot eivät päde näin lyhyelle kuormitukselle, vaan ovat pitkäaikaisemman kuormituksen arvoja. Tästä syystä päätettiin, että mallin eristeen murtolujuutta voidaan kasvattaa myös, jotta malli saadaan vastaamaan kuormituskokeita. Kuvasta 4.5 nähdään miten pelkkä kimmokertoimen muuttaminen vaikutti laskennan tuloksiin. Kuvassa eristeen kimmokerroin muutetaan 10 MPa:sta 30 MPa:han kappaleen 2.2 mukaisesti. Kimmokertoimen lisäksi myös materiaalin lujuus on epäselvä, nyt molemmissa käytettiin 100 kPa:n murtolujuutta. Kimmokerroin vaihdettiin vastaamaan kuormituksen alun kimmoisen alueen arvoa, joka oli edellä mainittu 30 MPa:ta.

Koska eristeiden materiaaliominaisuuksien muuttaminen vaikuttaa ilmeisen paljon laskentamallin käyttöön, olisi eristeen materiaalitietojen todellisten arvojen tietäminen tärkeää kunnollisten tulosten saamiseksi. Rakenteen muiden materiaalien ominaisuudet olivat

hyvin tiedossa, koska kuormitusten yhteydessä koekuormitettiin betonilieriöitä ja harjateräksiset ovat luotettavan tasalaatuisia. Ainoaksi epävarmuudeksi jää siis eriste, jonka mekaanisista materiaaliominaisuuksista on tarjolla hyvin vähän tietoa. Kuvan 4.5 kuvaajan laskentaan käytetyt eristeiden materiaaliarvot olivat valmistajan, jonka eristeitä ei käytetty kuormituskokeissa. Eri valmistajan arvoja käytettiin siksi, että VTT:n kuormittamien seinien harkkojen eristeiden valmistajalta ei löytynyt käytettäväksi mekaanisia materiaaliominaisuuksia. Lisäksi, vaikka materiaaliominaisuuksia olisi löytynyt, ne olisivat olleet yhtä huonoja vertailuarvoja kuin nyt käytetyt, sillä nekin olisivat olleet pidemmälle kuormitukselle tarkoitettuja.

5. TULOKSET

Tulokset Ansys-laskennasta päädyttiin esittämään siirtymä-voima kuvaajina, jotta niitä voitaisiin mahdollisimman hyvin verrata VTT:n tekemiin kuormituksiin (esitetty kuvissa 3.2 ja 3.2). Laskennan tulokset on esitetty kuvissa 5.1 ja 5.2, samat kuvaajat löytyvät suurempina liitteistä 4 ja 5. Kuvaajien päälle on piirretty myös B9:n mukainen kestävyysarvo sekä analyttisin kaavoin laskettu kestävyysarvo (kuvissa nimetty "*lujuuslaskenta*").

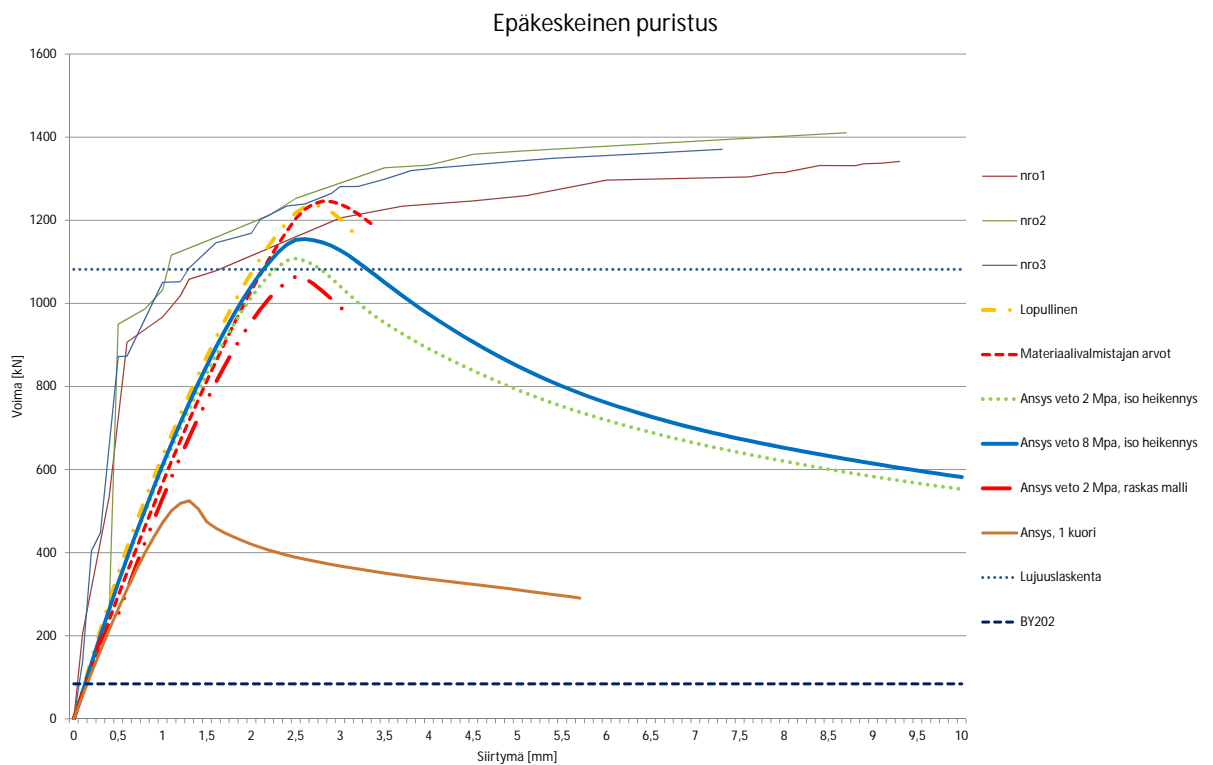


Kuva 5.1: Taivutetun ja puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja. Kuvaaja suurempana liitteessä 4.

Taivutetun ja puristetun rakenteen tuloksista on esitetty koetulosten lisäksi viisi erilaista Ansyskellä laskettua tulosta, käsinlaskennat sekä pelkän sisäkuoren siirtymä. Kaikissa kuvaajissa geometria, betonin materiaali malli ja rakenneteräksen materiaali malli pysyvät samana, muutoksen kohteena on vain eristeen ominaisuudet. Punaisessa katkoviivassa eristeellä on materiaalivalmistajan ilmoittamat lujuusarvot (katso kappale 4.3). Las-

kennasta lujemmalla eristeellä on kolme kuvaajaa, jotka osoittavat, että eristeen ominaisuuksia muuttamalla laskenta on mahdollista saada toimimaan halutusti. Kovalla eristeellä lasketuista tuloksista yksi valittiin lopulliseksi tulokseksi sen kuvatessa kuormituskokeita molemmissa kuormituksissa parhaiten. Näiden lisäksi on laskettu ansyskellä yhden yksittäisen kuoren kuormitus. Lujuuslaskentaviivan arvo on laskettu kappaleessa 4.1 ja BY202:n mukainen arvo on laskettu kappaleen 2.3 mukaisesti. Liitteessä 6 on esitetty BY202:n mukaiseen laskentaan käytetyt lukuarvot.

Epäkeskeisesti puristetun rakenteen tuloksissa on esitetty koetulosten lisäksi kuusi erilaista Ansyskellä laskettua tulosta sekä käsinlaskennan tulokset. Kuvaajissa muutettiin jonkin verran geometriaa ja materiaaliominaisuuksia. Punainen kaksoispistekatkoviiva on tiheästi verkotetulla, raskaalla mallilla laskettu kestävyys, jossa eristeellä on materiaali valmistajan ominaisuudet ja betonin vetopuolen lujuus on 2 MPa. Vihreä katkoviiva ja sininen yhtenäinen viiva ovat eri vetolujuuksilla ja vetoalueen heikennyksillä lasketut kestävyys, jotka vastaavat käytännössä raskaan mallin tuloksia. Keltainen pistekatkoviiva on laskettu kovalla eristeellä, lopullisilla materiaaliominaisuuksilla (esitelty kappaleessa 2.2). Näiden lisäksi on yhdellä kuorella laskettu kuvaaja.

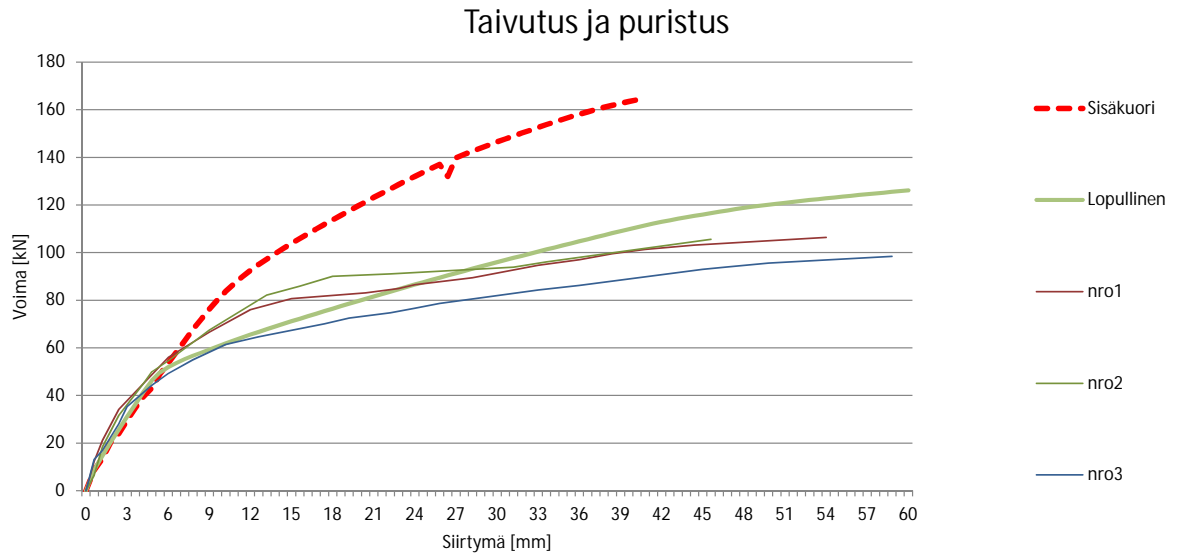


Kuva 5.2: Puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja. Kuvaaja suurempana liitteessä 5.

6. TULOSTEN TARKASTELU

Kuten kappaleissa 2.4, 4.2 ja 4.3 jo todettiin, jouduttiin laskennassa tekemään melko paljon kompromisseja ja oletuksia, jotta tulokset saatiin vastaamaan kuormituskokeiden tuloksia. Työn alusta asti tiedossa ollut betonirakenteiden laskemisen haastavuus elementtimenetelmällä asetti laskennalle omat reunaehdot, jotka saatiin lopulta hoidettua melko hyvin. Suurimmaksi epävarmuustekijäksi osoittautui lopulta eristeen materiaaliominaisuuksien määrittäminen. Varsinkin jos katsotaan työn rajausta pidemmälle ja mietitään eristeen hyödyntämistä liittovaikutuksen saamiseen rakennesuunnittelussa, ovat eristeen materiaaliominaisuuksien epävarmuuden ja pitkäaikaiskestävyysongelmat ongelmia, joita tämän työn aikana ei saatu ratkaistua. Laskentamalli osoitti kuitenkin sen, että eristeellä on iso vaikutus kantavuuteen, sillä muuten sen ominaisuuksien vaihtaminen ei vaikuttaisi tuloksiin niin paljoa. Erityisesti nurjahdusta vastaan eriste antaa aidosti tukea.

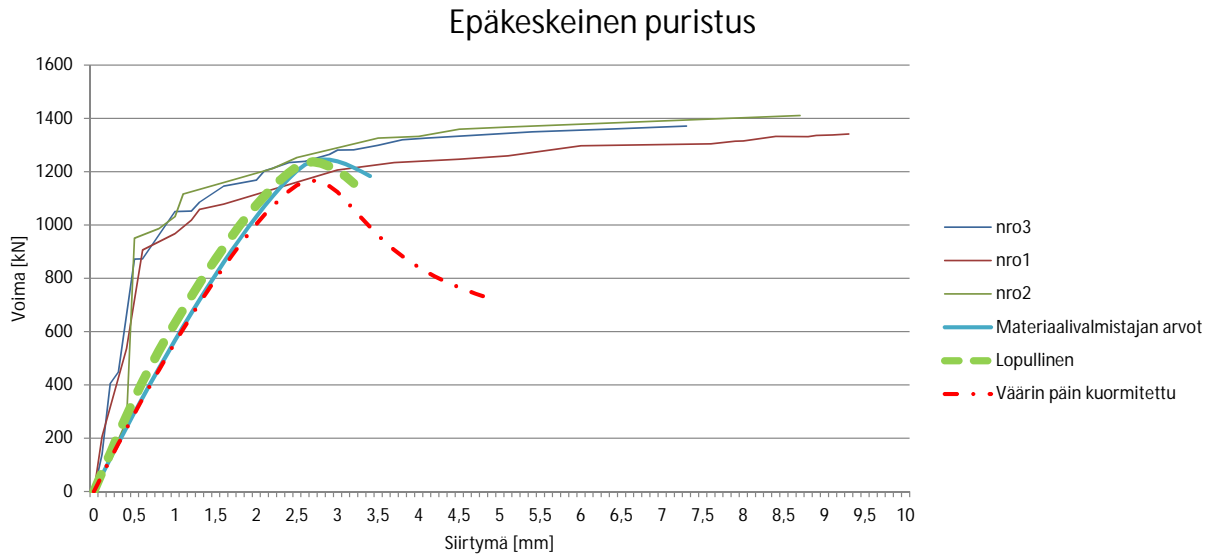
Eristeen materiaaliominaisuudet vaikuttavat erityisesti taivutetun seinän pieniin voimiin. Lopullinen murtuminen tapahtuu kutakuinkin samalla voimalla kuin jäykemmälläkin eristeellä. Koska todellisissa rakenteissa toimitaan pienillä siirtymillä, jättävät tällä laskentatavalla eristeen ominaisuudet oleelliselle alueelle melko paljon epävarmuutta. Laskenta kokeiltiin ajaa myös siten, että kuorma asennettiin eristeen ohi suoraan sisäkuoreen, jolloin eristeet menevät vedolle eikä puristukselle, ja siirtymä-voima -kuvaaja kertookin sisäkuoren siirtymä-voima vastaavuudesta. Tulos on esitetty verrattuna työssä saatuun lopulliseen laskentamalliin kuvaajassa 6.1. Kuvasta nähdään, että oikeassa mallissa eriste on painunut kasaan, ja pienemmillä siirtymillä saadaan aikaan suurempia voimia, eli voima menee enemmän betonikuorelle kuin eristeelle verrattuna lopulliseen laskentamalliin. Suurempi kestävyys saattaa johtua esimerkiksi siitä, että ollessaan vedolla eriste toimii enemmän tukena nurjahdusta vastaan kuin ollessaan puristuksella. Mielenkiintoista on se, että alun kimmokerroin on sama lujalla eristeellä nyt kun kuorma on sisäkuorella. Tulos vahvistaa käsitystä siitä, että arvioitu eristeen kimmokerroin vastaa kuormituskokeessa voimassa ollutta eristeen kimmokerrointa.



Kuva 6.1: Taipuma-voima -kuvaaja kun kuorma on sisäkuorella ja eristeillä on materiaalivalmistajan arvot. Vertailuviivana tulos, jossa kuorma on ulkokuorella kuten kuormituskokeissa ja eristeillä on lujat, tulosten perusteella arvioidut arvot

VTT:n kokeissa epäkeskeisesti puristettu rakenne (esitetty liitteessä 2) kuormitettiin epäkeskisyydellä, joka aiheutti vetoa eristeeseen kuorien välillä. Todellisissa rakenteissa välipohjalta tuleva epäkeskisyyys aiheuttaa puristusta eristykseen ja kellarirakenteissa maanpaine painaa tätä epäkeskisyyttä vastaan. Koejärjestely oli siis alusta asti varmuustasoltaan varmalla puolella kantavuuden kannalta. Laskentamallissa epäkeskisyyden suunnalla ei ole merkitystä tuloksiin, koska materiaalimallin lujuusominaisuudet eivät eroa puristukselle ja vedolle. Testattaessa kuormituksen suunnan vaihtamista laskentamallissa, oli tuloksena tismalleen sama siirtymä-voima -kuvaaja. Laskentamallissa on siis sisäistä varmuutta, koska epäkeskeisesti puristetun seinän kuormituskokeissa murto tapahtui eristeeseen irrotessa kuoresta, jota siis ei tapahdu eristeessä ollessa puristettuna. Oletettavaa on, että murtokuorma kuormituskokeessa olisi ollut suurempi jos epäkeskisyyttä olisi ollut toisin päin ja eriste olisi ollut puristettuna.

Yksi epäkeskeisesti puristetuista rakenteista kuormitettiin VTT:n kokeissa väärin päin, ja sama toistettiin laskennallisesti. Tulokset on esitetty kuvaajassa 6.2, josta nähdään että laskennallisesti seinä toimi täysin samoin kuten oikeasti kuormitettuna. Odotetusti vetojännitysten vastaanottamiseen tarkoitetut teräkset eivät joudu rakenteessa vedolle, kun kuormana on puristusvoima. Teräksen menevät vedolle vasta rakenteen nurjahdettua, eli niiden vaikutus murtokuormaan on vähäinen.



Kuva 6.2: Taipuma-voima -kuvaaja kun kuormitus suoritettiin ns. väärin päin olevalle rakenteelle, eli teräkset olivat enemmän puristus- kuin vetopuolella. Eristeenä materiaalivalmistajan mukainen eriste.

Laskennallisesti kuormitettiin myös yksikuorinen rakenne, jossa ei ollut eristyksiä. Periaatteessa kyseisen kuormituksen pitäisi korreloida melko hyvin BY202:n laskennan kanssa, koska myös se laskettiin vain yhdelle kuorelle. Kuvaajassa 5.1 oleva BY202:n mukaan laskettu arvo on laskettu siten, että seinälle asetettiin 30 kN puristusvoima ja laskettiin suurin epäkeskisyys, jonka sille voimalle voi antaa, jotta seinä pysyy pystyssä. Sen jälkeen laskettiin, mitä momenttia kyseinen epäkeskisyys vastaa ja laskettiin, kuinka suuri vaakavoima vastaa samaa momenttia. Yksittäisen kuoren Ansyslaskenta osoittaa, että mallissa on melko paljon varmuutta. Varmuuden huomaa siitä, että seinä ei kestänyt kuin parin millin taivutuksen, jonka jälkeen se nurjahti 30 kN:n puristusvoimasta. Tuloksesta huomaa myös sen, että työssä tehdyillä laskentaoletuksilla toisen kuoren mukaan ottaminen analyysiin tuo melkoisesti lisää kapasiteettia.

Kappaleessa 2.1 esitetyillä analyttisillä kaavoilla lasketut kestävyysarvot osuivat yllättäen melko lähelle todellista kestävyyttä. Niissä materiaalin oletettiin olevan ideaalisesti kimmoinen ja toimivaksi poikkileikkaukseksi oletettiin yksi kuori ilman mitään vähennyksiä. Teräksiä ei huomioitu mitenkään. Kyseisissä kuormituksissa eristeharkkoseinä toimi kutakuinkin yhtä hyvin kuin yksi kuori toimisi ideaalisesti. Nämä tulokset osoittavat vain, että todelliset kestävyysarvot ovat betonirakenteilla huonommat kuin ideaalitalanteissa, niinkuin kuuluukin olla. Esimerkiksi epäkeskeisesti puristetussa kuormituksessa yhden kuoren puristus on noin puolet tuosta ideaalista kestävyydestä, ja normin mukainen arvo on viidesosa siitä, mistä voidaan päätellä että tulokset ovat ainakin jollain asteella johdonmukaisia.

7. YHTEENVETO

Lopulta laskennassa päästiin haluttuun lopputulokseen, jossa laskennallinen kestävyys vastasi todellisen kuormitetun rakenteen kestävyyttä. Tulokseen päästiin muokkaamalla eristeen materiaaliominaisuuksia laskentaan sopiviksi. Muokkaamisen takia lopullisissa tuloksissa on suuri epävarmuus siitä, kuinka todellisia ne ovat, sillä eristeiden materiaaliominaisuuksista ei saatu riittäviä tietoja. Eristeen ominaisuudet vaikuttivat erityisesti taivutetun rakenteen tuloksiin. Toisaalta taivutetun rakenteen normin mukainen kestävyys on jo melko lähellä kuormitettujen rakenteiden kestävyyttä, eikä sen nostamiseen tarkemmalla laskennalla siten näy merkittävää tarvetta. Suuremmat siirtymät alkoivat taivutetun rakenteen kuormituksissa jossain hieman yli 60 kN:n vaakavoimalla ja normin sallima arvo on hieman alle 20 kN, eli kokonaisvarmuus on noin kolminkertainen. Epäkeskeisesti puristetulle rakenteelle normi antoi merkittävästi alhaisemman tuloksen kuin mitä kuormituksissa saatiin. Normin arvo on jollain lailla linjassa yksittäisen kuoren nurjahduskuormaan, mutta koko rakenteen kuormasta arvo on vain kymmenyksen. Suuren puristuskuorman rakenteille tarkemmasta analyysistä olisi siis varmasti etua.

Vaikka laskentamalli saatiin vastaamaan kuormituskokeita, ei sama malli toimi oikeiden rakenteiden rakennesuunnittelussa. Lopulliseen malliin päästiin säätämällä eristeen ominaisuuksia ja samalla huomattiin, että ne vaikuttavat paljon mallin toimintaan. Koska eristeen materiaaliominaisuudet todettiin epävarmuustekijäksi laskennassa, olisi eristetilaa syytä asentaa esimerkiksi välirautoja, jotka voitaisiin ottaa laskentamalliin mukaan. Tällä tavalla välttyttäisiin eristeen laskentaan mukanaan tuomista epävarmuuksista ja saataisiin varmennettua rakenteen toiminta myös pitkäaikaisesti. Tällä tavalla asennettu lisäraudoitus ei juuri vaikeuttaisi asennusta ja varmistaisi kuorien toiminnan yhdessä. Saaduista tuloksista huomattiin kuitenkin se, että rakenteen yhteistoiminta nostaa merkittävästi rakenteen kestävyyttä, eli tarkemmalle laskennalle on tarvetta.

Työn yksi motiivi oli saada luotua laskentamalli, joka olisi jalostettavissa laskentamalliksi, jolla voitaisiin laskea kapasiteetikäyriä erilaisille harkkoseinille. Tähän tavoitteeseen päästiin. Myöhemmin selvitettäväksi jäi vain muutenkin työn ulkopuolelle rajatut pitkäaikaiskestävyys- ja varmuusongelmat. Edellisessä kappaleessa mainittu mekaaninen kiinnitys kuorien välillä on työn aikana esille tullut vaihtoehto sekä pitkäaikaiskestävyys, että varmuusongelmaan. Jos voimat siirretään puhtaasti eristeellä, joudutaan riittävän

varmuuden saamiseksi eristeen ominaisuuksia huonontamaan paljon. Paljon huononnetut eristeen mekaaniset ominaisuudet taasen poistavat nopeasti kuorten yhteistoiminnasta saavutetun edun nurjahdusta vastaan.

LÄHTEET

- [1] ANSYS usermanual, Release 13.0.
- [2] RIL 131-2004 BETONINORMIT. 2004.
- [3] RT 35-10844 BETONIHARKOT, Muuraustarvikkeet. 04 2005.
- [4] SFS-EN ISO 1992-1-1 + AC, EUROKOODI 2: BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1-1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT. 217 s. 2005.
- [5] RT/KH 375.2-37675, THERMISOL EPS -ERISTEET. 12 2008.
- [6] Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B9. MUOTTIHARKKORAKENTEET, EHDOTUS 2.3.2011. 10 s. 2011.
- [7] RT 36-11113 EPS-ERISTEET, Lämmöneristystarvikkeet. 02 2013.
- [8] Eero Saarinen, Leo Kähkönen. BY 202 osa 2. 1983.
- [9] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 2005.
- [10] Lammin Betoni Oy. Lammin betonin kotisivut. internetsivu, 19/4/2013. <http://www.lamminbetoni.fi/portal/fi/konserni/>.
- [11] Erkki Pennala. Lujuusopin perusteet. 8 2000.
- [12] Stephen P. Timoshenko, James M. Gere. Theory of Elastic Stability second edition. 2009.
- [13] Reijo Ylämäki. Muottiharkkoseinän testaus ja materiaalien lujuuden määrittäminen. VTT-raportti Nro VTT-S01949-12. 3 2012.

A. LIITTEITÄ

1. Lammin betonin Tuoteseloste Lammi-lämpökivet
2. VTT:n kokeessa kuormitettujen seinien valmistuskuvat
3. THERMISOL EPS-ERISTEIDEN TEKNISET OMINAISUUDET
4. Taivutetun ja puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja
5. Epäkeskeisesti puristetun rakenteen siirtymä-voima -kuvaaja
6. B9:n ja BY202:n mukaiset laskennat

SUORITUSTASOILMOITUS

Nro: LL400CPR1306



1. Tuotetyyppi: Normaalipainoisesta betonista valmistetut eristemuottiharkot.
2. Tuotetyypin yksilöllinen tunnistus: LL400 -tuoteperhe, joka käsittää seuraavat tuotteet:
- LL Suora kivi
- LLK Kulmakivi
- LLP Päätykivi
- LL2 Osakivi
3. Suunniteltu käyttötarkoitus: Normaalipainoisesta betonista valmistetut eristemuottiharkot sisä- ja ulkoseiniin.

4. Valmistaja:


Lammin Betoni Oy
Paarmamäentie 8
FI-16900 LAMMI
FINLAND
+358 207 530 400

6. Rakennustuotteen suoritustason
pysyvyyden arviointi- ja
varmentamismenettely:

AVCP -luokka 4.

9. Ilmoitetut suoritustasot:

Perusominaisuudet	Suoritustaso				Yhdenmukaistettu tekninen eritelmä
	LL	LLK	LLP	LL2	
Yksityiskohtien suunnittelu:					SFS-EN 15435: 2008-09-22
- pituus, mm	600	600	600	600	
- leveys, mm	400	400	400	400	
- korkeus, mm	200	200	200	200	
- kuorien paksuus, mm	21	21	20	20	
- kannasten paksuus, mm	32–40	36–44	36–44	36–44	
- valuontelon mitat, mm	164x77	178x77	242x77	164x77	
- mittatoleranssi, kaikki mitat, mm	± 3	± 3	± 3	± 3	
- kannasten urien ala, mm ²	4310	4310	4310	4310	
Kuivumiskutistuma/ Kosteusmuodonmuutos	NPD				
Palokäyttäytyminen:					
- harkkokuori	Euroluokka A1				
- eriste	Euroluokka F				
Vesihöyrynläpäisevyys	NPD				

Perusominaisuudet	Suoritusaste				Yhdenmukaistettu tekninen eritelmä
	LL	LLK	LLP	LL2	
Lujuus: - kannasten vetolujuus, N/mm² - kuorien taivutuslujuus, N/mm²			0,30 1,90		SFS-EN 15435: 2008-09-22
Ilmaääneneristävyys ¹⁾ : - harkkojen neliöpaino, kg/m²			227		
Lämmönvastus ¹⁾ : - kuorien nettokuivatiheys, kg/m³ - eristeen lämmönjohtavuus, W/mK			2300 0,030		
Säilyvyys: - pakkasenkestävyys ²⁾	Hyväksytty, ei silminnähtäviä vaurioita.				

¹⁾ Ominaisuudet riippuvat valmiiden seinien yksityiskohdista. Seinärakenteiden ilmaääneneristävyyden- ja lämmöneneristävyyden arvot on ilmoitettu suunnitteluohjeissa.

²⁾ Standardin SFS 7018: 2010-02-15, liitteen 1 mukainen pakkasenkestävyydesti.

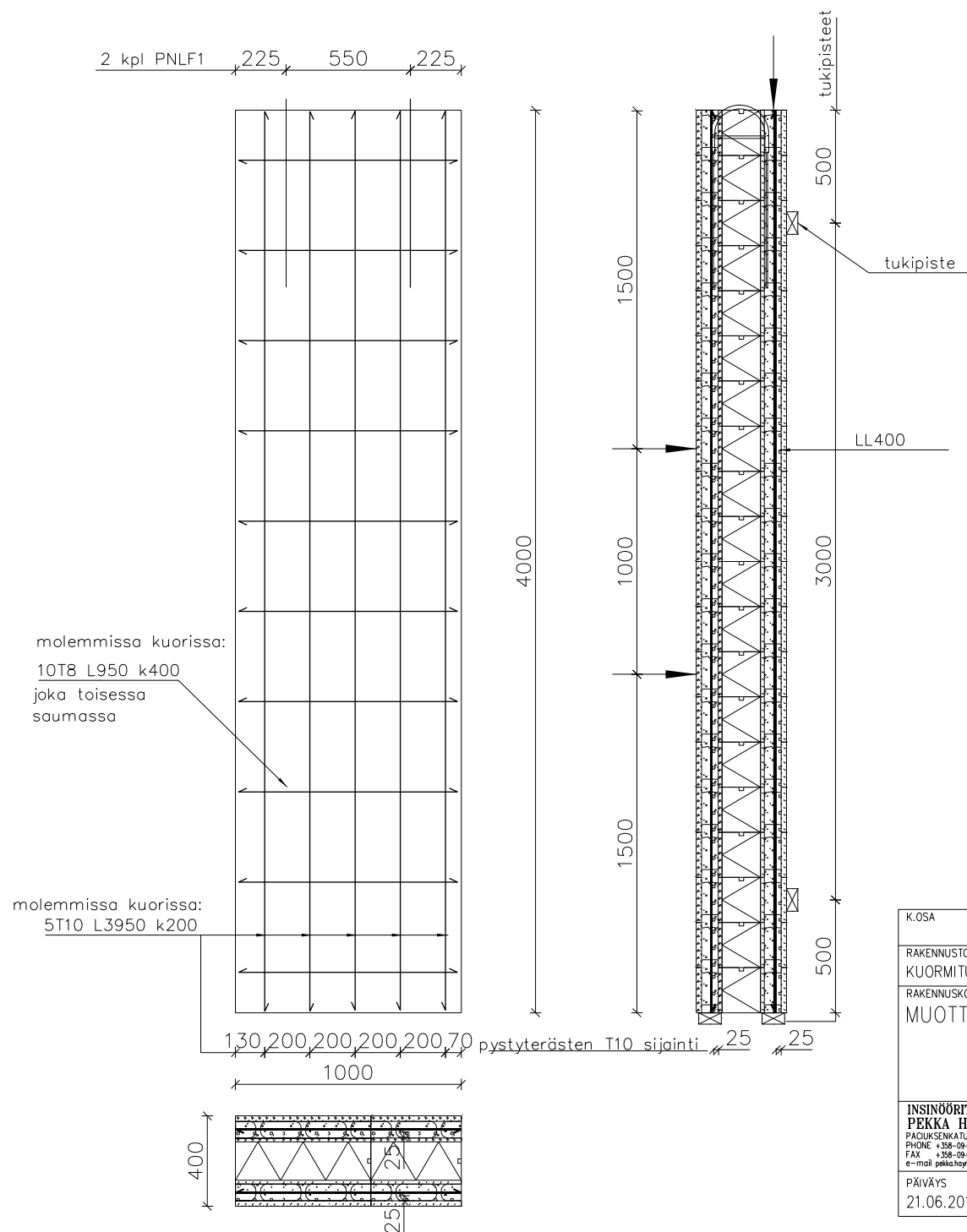
10. Edellä 1 ja 2 kohdassa yksilöidyn tuoteperheen / yksilöityjen tuotteiden suoritusasteet ovat 9 kohdassa ilmoitettujen suoritusasteiden mukaiset. Tämä suoritusasteilmoitus on annettu 4 kohdassa ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla:

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:



Jussi Salo
.....
Jussi Salo, Tuotantojohtaja

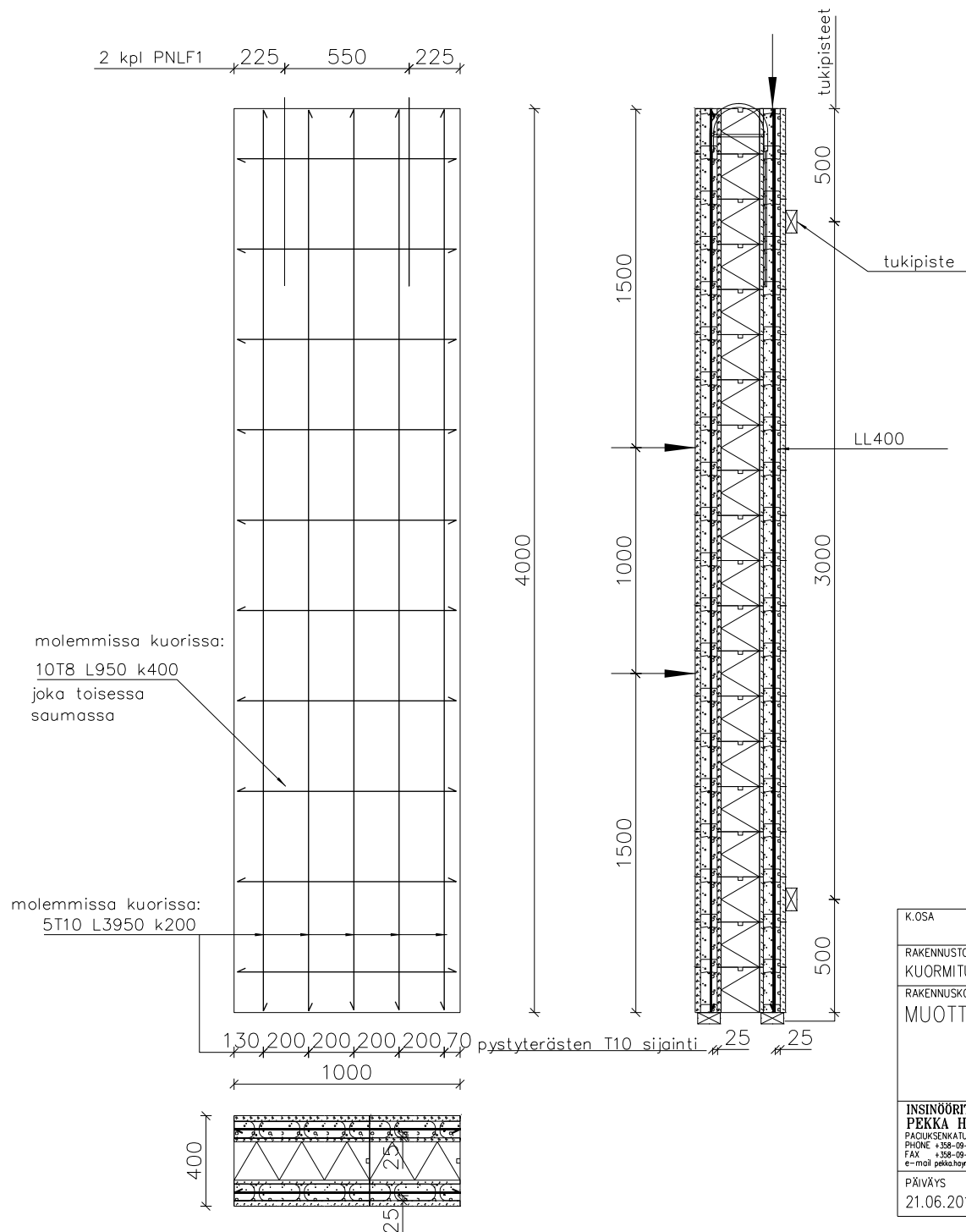
Hämeenlinnassa 20.6.2013



Koe-elementti E1:
Valmistetaan 3 kpl
Paino G = 21 kN

Betoni: K 30-2 (C25/30)
Teräs: T= A 500 HW
Betoni- ja teräsbetoni: 25 mm kuoren sisäpinnasta

K.O.S.A.	KORTTELI/TILA	TONTTI/RNo	RAKENNUSLUVAN TUNNUS			
RAKENNUSLOINENPIDE KUORMITUSKOE			PIIRUSTUSLAJI RAKENNEPIIRUSTUS	JUOKS.No		
RAKENNUSKOHTEN NIMI JA OSOITE MUOTTIHARKKOSEINÄN KUORMITUSKOE			PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ KOE-ELEMENTTI E1 VAAKAKUORMITUSTA VARTEN	MITTAKAAVAT 1:20		
INSINÖÖRITOIMISTO PEKKA HÄYRINEN OY PACUUSKATU 19 FIN-00270 HELSINKI PHONE: +358-09-5680251 FAX: +358-09-5680251 e-mail: pekka.hayrinen@kolmibus.fi			SUUNN. ALA RAK	TYÖ No	PIIR.No 1	MUUTOS
PÄIVÄYS 21.06.2011	SUUNN.					



Koe-elementti E1:
Valmistetaan 3 kpl
Paino G = 21 kN

Betoni: K 30-2 (C25/30)
Teräs: T= A 500 HW
Betonipeite: 25 mm kuoren sisäpinnasta

K.OSA		KORTTELI/TILA		TONTTI/RNO		RAKENNUSLUVAN TUNNUS			
RAKENNUSTOIMENPIDE KUORMITUSKOE						PIIRUSTUSLAJI RAKENNEPIIRUSTUS		JUOKS.No	
RAKENNUSKOHTIEN NIMI JA OSOITE MUOTTIHARKKOKSEINÄN KUORMITUSKOE						PIIRUSTUKSEN SISÄLTÖ KOE-ELEMENTTI E1 VAAKAKUORMITUSTA VARTEN		MITTAKAAVAT 1:20	
INSINÖÖRITOIMISTO PEKKA HÄYRINEN OY PADIUKSENKATU 19 FIN-00270 HELSINKI PHONE +358-09-5680251 FAX +358-09-5680251 e-mail pekka.hayrinen@columbus.fi						SUUN.ALAI RAK	TYÖ No	PIIR.No 1	MUUTOS
PÄIVÄYS 21.06.2011		SUUNN.							

THERMISOL EPS-ERISTEIDEN TEKNISET OMINAISUUDET:

Ominaisuus ja käytettävä testimenetelmä	Lattiaeristeet (1)				Routaeristeet			Seinäeristeet		Kattoeristeet		
	EPS 60 Lattia	EPS 100 Lattia	EPS 200 Lattia	EPS 300 Lattia	EPS 120 Routa	SUPER 200	SUPER 300	EPS 60S Seinä	EPS 100S Seinä	EPS 60S Katto	EPS 80S Katto	EPS 100S Katto
Pituus ja leveys, mm (EN 822:1994)	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 0,6 % tai ± 3	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2
Paksuus, mm (EN 823:1994)	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 1	± 1	± 2	± 2	± 2
Suorakulmaisuus, mm/m (EN 824:1994)	± 2	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2
Tasomaisuus, mm/m (EN 825:1994)	± 10	± 30	± 15	± 15	± 30	± 30	± 30	± 5	± 5	± 10	± 10	± 10
Mittapysyvyys/-tarkkuus (normaalit olosuhteet), mm/m (EN 1603:1996)	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2
Mittapysyvyys/-tarkkuus (korotettu lämpötila tai kosteuspitoisuus), % (EN 1604:1996)								≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %
Mittapysyvyys/-tarkkuus (korotettu lämpötila ja kuormitus), mm/m (EN 1605:1996)										≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 5 %
Lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo $\lambda_{\text{Declared}}$, W/mK (EN 12667:2001)	0,039	0,036	0,033	0,033	0,036	0,033	0,033	0,039	0,036	0,039	0,036	0,036
Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ_{Design} , W/mK (2) (EN ISO 10456:1999)	0,039 ³⁾	0,036 ³⁾ 0,038 ⁴⁾	0,033 ³⁾ 0,034 ⁴⁾	0,033 ³⁾ 0,034 ⁴⁾	0,038 ⁴⁾ 0,039 ⁵⁾ 0,041 ⁶⁾	0,034 ⁴⁾ 0,035 ⁵⁾ 0,036 ⁶⁾	0,034 ⁴⁾ 0,035 ⁵⁾ 0,036 ⁶⁾	0,039	0,036	0,039	0,036	0,036
Puristuslujuus 10 %, kPa (EN 826:1996)	≥ 60	≥ 100	≥ 200	≥ 300	≥ 120	≥ 200	≥ 300	≥ 60	≥ 100	≥ 60	≥ 80	≥ 100
Taivutuslujuus, kPa (EN 12089:1997)	100	150	250	450	170	250	450	100	150	100	125	150
Pitkäaikainen puristuslujuus, kPa (EN 1606:1996)	≤ 2 % (20 kPa)	≤ 2 % (35 kPa)	≤ 2 % (60 kPa)	≤ 2 % (90 kPa)	≤ 2 % (40 kPa)	≤ 2 % (60 kPa)	≤ 2 % (90 kPa)					
Kimmokerroin E, suunnitteluarvo (MPa)	4	8	16	24	10	16	24					
Vedenimeytyminen, til-% (EN 12087:1997)		≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 1	≤ 1					
Vesihöyrynläpäisevyys, kg/(m ² sPa) (EN 12086:1997)								5..7 x 10 ⁻¹²	3.6 x 10 ⁻¹²	5..7 x 10 ⁻¹²	4.6 x 10 ⁻¹²	3.6 x 10 ⁻¹²
Palo-ominaisuudet, europololuokat ***) (EN 11925-2:2002, EN 13823:2002)	D, E, F	D, E, F	D, E, F	D, E, F	F	F	F	D, E	D, E	D, E	D, E	D, E

1) Lattiaeristeitä valmistetaan myös vaikeasti syttyvänä S-laatusena

***) Taulukossa ilmoitetaan vähimmäisvaatimus: S-laatu aina vähintään E tai D, normaali laatu F.

2) λ_{design} riippuu eristeen suojaus- ja asennustavasta sekä kosteustilasta.

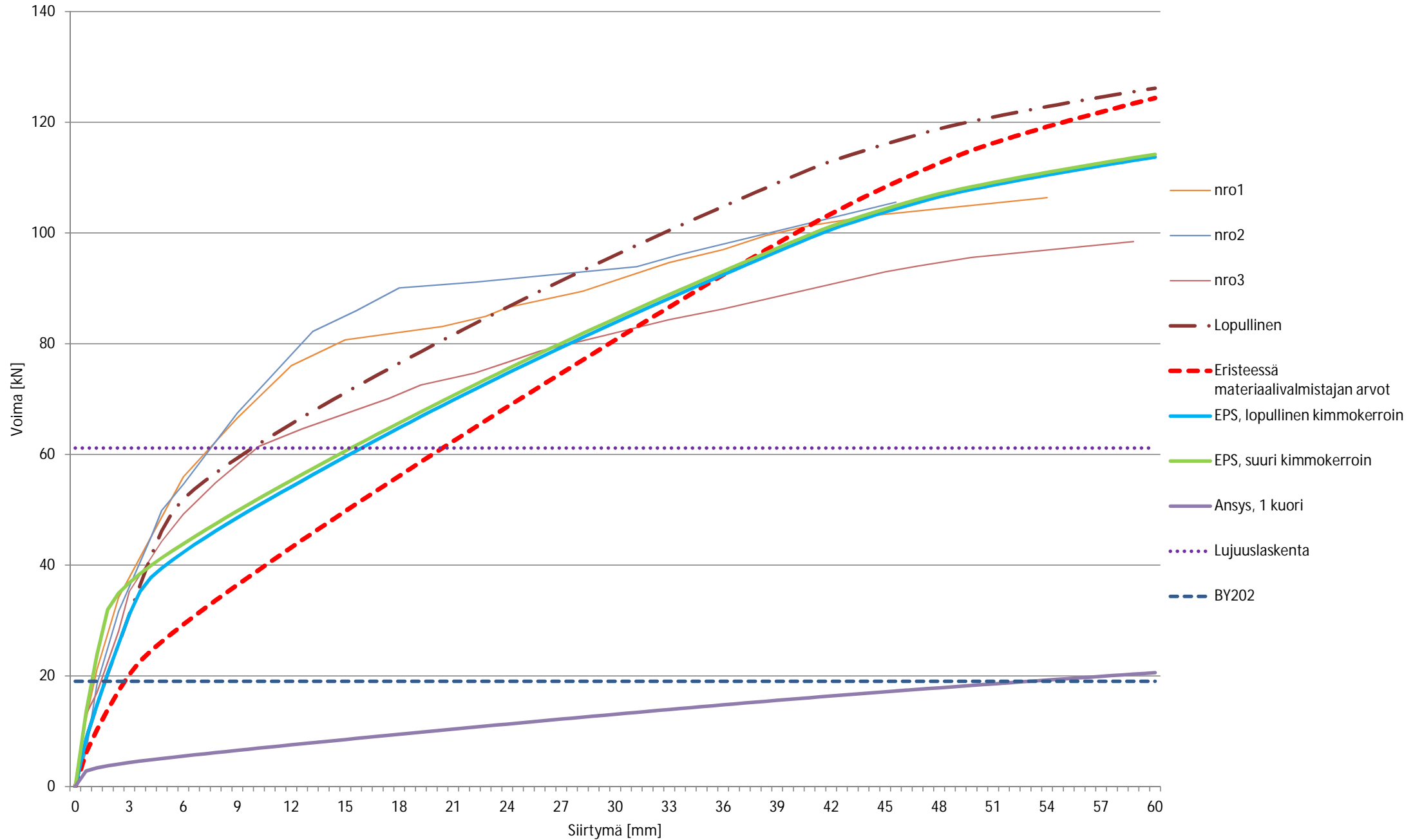
3) Alapohja- ja lattiarakenteet. Käyttötilassa eristeen kosteuspitoisuus on alle 1 til-%.

4) Perustusten sisäpuolinen pystyeristys

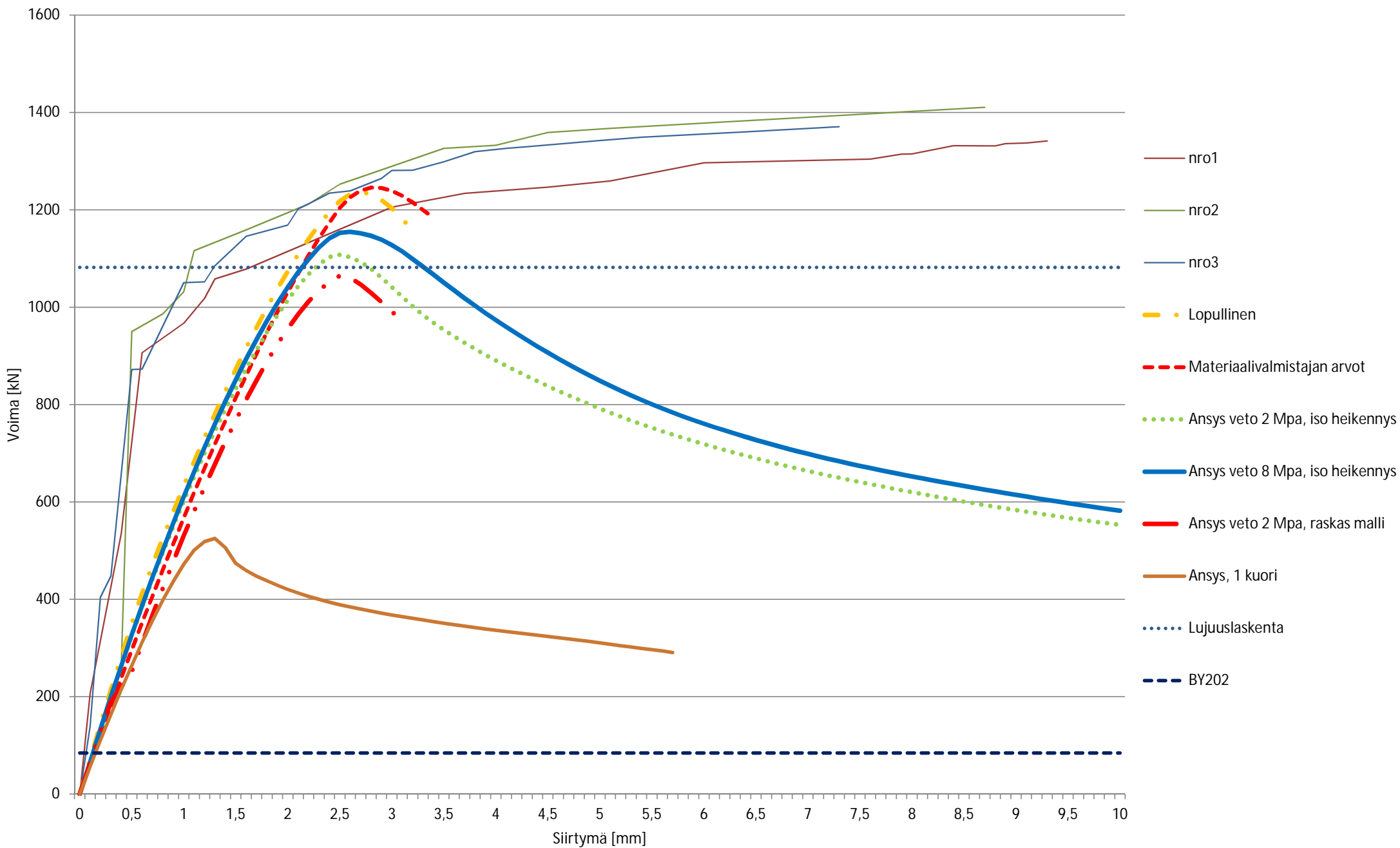
5) Perustusten ulkopuolinen pystyeristys

6) Maakerrosten välissä oleva routaeriste rakennuksen ulkopuolella (kallistus väh. 2 %).

Taivutus ja puristus



Epäkeskeinen puristus



Muottiharkkoseinän mitoitus B9 mukaan

Taivutettu ja puristettu rakenne

Betonin osavarmuusluvut		
	Murtorajatila	Käyttörajatila
γ_c	1,8	1

Puristuskestävyys (raudoittamaton)

b	1000 mm	poikkileikkauksen leveys
t_c	77 mm	valuontelon leveys
f_{ck}	34 MPa	raudoittamattoman betonin puristuslujuuden ominaisarvo
t_{ef}	151,190526 mm	seinän tehollinen paksuus (kuivatiheys yli 2200 kg/m ³ , leveytenä voi käyttää harkon leveyttä)
e_{tot}	30 mm	standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 12.6.5.2 mukainen epäkeskisyyys (suurin ensimmäisen kertaluvun epäkeskisyyys koko seinän korkeudella)
l_0	3000 mm	on standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 12.6.5.1 mukainen nurjahduspituus
t_b	120 mm	muottiharkon leveys
k_1	0,015	kerroin
Φ	-0,04594939	hoikkuuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin
N_{Rd}	-66,8308285 kN	Yksinkertaistettu menetelmä ei riitä, joten käytetään raudoitetun seinän laskentaa!
N_{Rk}	-120,295491 kN	

Momenttikestävyys

f_{yk}	500	Mpa	Teräksen vetolujuuden ominaisarvo
A_s	471,238898	mm ²	Terästen pinta-ala (6T10)
y_k	6,929983795	mm	
y_d	12,47397083	mm	
d	74	mm	Terästen keskiöetäisyys harkon pinnasta
e	5	mm	asennustoleranssi
d_1	58,5	mm	laskennallinen tehollinen leveys
z_k	55,0350081		
z_d	52,26301458		
M_{uk}	12,96731829	kNm/m	
M_{ud}	12,3141827	kNm/m	

Sallittu vaakavoima

Yhdelle kuorelle:

momenttivarsi	1	m	Yhdistetty kuormitus (laskettu puristuskestävyyden M_{OEd} arvon kautta)
N_1	25,93463657	kN	19,01155965 kN

Puristuskestävyys (raudoitettu)			
	MRT	BY202	KRT
N_{Ed}	30 kN		
e_N	316,8593275 mm		
M_{0Ed}	9,505779824 kNm		
n	1,32353E-05	7,35294E-06	$n = N_{Ed}/(A_c f_{cd})$, suhteellinen normaalivoima
n_u	1,103949757		$n_u = 1 + \omega$
n_{bal}	0,4		n_{bal} on suhteellisen normaalivoiman n arvo, kun taivutuskestävyydellä on maksimi-arvo; arvoa 0,4 voi käyttää
A_c	120000 mm ²		
ω	0,103949757	0,057749865	$\omega = A_s f_{yd}/(A_c f_{cd})$
K_r	1	1	$K_r = (n_u - n)/(n_u - n_{bal}) \leq 1$ K_r on korjauskerroin, joka riippuu normaalivoimasta, ks. kohtaa 5.8.8.3 (3)
Virumaa ei huomioida			
			K_{ϕ} on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon viruminen, ks. kohtaa 5.8.8.3 (4)
E_s	200 GPa		
ε_{yd}	0,0025		$\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$
$1/r_0$	7,50751E-05 1/mm		$1/r_0 = \varepsilon_{yd}/(0,45 d)$
$(d/d_h)^2$	0,483931947	1	Harkkorakenteen huomioon ottava kerroin $1/r$ kaarevuuden laskentaan
$1/r$	3,63312E-05 1/mm	0,000102564	$1/r = K_r \cdot K_{\phi} \cdot 1/r_0$
c	8		(4) Vakiopoikkileikkaukselle käytetään normaalisti arvoa $c = 10 (\approx \pi^2)$. Jos ensimmäisen kertaluvun laskennan momentti on vakio, on syytä valita pienempi arvo (8 on alaraja, joka vastaa vakiosuuruista kokonaismomenttia).
e_2	40,87263066 mm	115,3846154	
M_2	1,22617892 kNm	3,461538462	$M_2 = N_{Ed} e_2$
M_{Ed}	10,73195874 kNm	12,96731829	$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2$ Laskettu BY202 mukaisesti, koska EN 1992-1-1 laskenta oletti raudoituksen olevan symmetrinen

Muottiharkkoseinän mitoitus B9 mukaan

Epäkeskeisesti puristettu rakenne

Betonin osavarmuusluvut		
	Murtorajatila	Käyttörajatila
γ_c	1,8	1

Puristuskestävyys (raudoittamaton)

b	1000 mm	poikkileikkauksen leveys
t_c	77 mm	valuontelon leveys
f_{ck}	34 MPa	raudoittamattoman betonin puristuslujuuden ominaisarvo
t_{ef}	151,190526 mm	seinän tehollinen paksuus (kuivatiheys yli 2200 kg/m ³ , leveytenä voi käyttää harkon leveyttä)
e_{tot}	30 mm	standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 12.6.5.2 mukainen epäkeskisyyys (suurin ensimmäisen kertaluvun epäkeskisyyys koko seinän korkeudella)
l_0	3000 mm	on standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 12.6.5.1 mukainen nurjahduspituus
t_b	120 mm	muottiharkon leveys
k_1	0,015	kerroin
Φ	-0,04594939	hoikkuuden ja epäkeskisyyden pienennyskerroin
N_{Rd}	-66,8308285 kN	Yksinkertaistettu menetelmä ei riitä, joten käytetään raudoitetun seinän laskentaa!
N_{Rk}	-120,295491 kN	

Momenttikestävyys

f_{yk}	500	Mpa	Teräksen vetolujuuden ominaisarvo
A_s	471,238898	mm ²	Terästen pinta-ala (6T10)
y_k	6,929983795	mm	
y_d	12,47397083	mm	
d	74	mm	Terästen keskiöetäisyys harkon pinnasta
e	5	mm	asennustoleranssi
d_1	58,5	mm	laskennallinen tehollinen leveys
z_k	55,0350081		
z_d	52,26301458		
M_{uk}	12,96731829	kNm/m	
M_{ud}	12,3141827	kNm/m	

Puristuskestävyys (raudoitettu)			
	MRT	BY202	KRT
N_{Ed}	89,19320144 kN		
e_N	30 mm		
M_{0Ed}	2,675796043 kNm		
n	3,93499E-05	2,18611E-05	$n = N_{Ed}/(A_c f_{cd})$, suhteellinen normaalivoima
n_u	1,103949757		$n_u = 1 + \omega$
n_{bal}	0,4		n_{bal} on suhteellisen normaalivoiman n arvo, kun taivutuskestävyydellä on maksimiarvo; arvoa 0,4 voi käyttää
A_c	120000 mm ²		
ω	0,103949757	0,057749865	$\omega = A_s f_{yd}/(A_c f_{cd})$
K_r	1	1	$K_r = (n_u - n)/(n_u - n_{bal}) \leq 1$ K_r on korjauskerroin, joka riippuu normaalivoimasta, ks. kohtaa 5.8.8.3 (3)
Virumaa ei huomioida			
E_s	200 Gpa		
ε_{yd}	0,0025		$\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$
$1/r_0$	7,50751E-05 1/mm		$1/r_0 = \varepsilon_{yd}/(0,45 d)$
$(d/d_h)^2$	0,483931947	1	Harkkorakenteen huomioon ottava kerroin $1/r$ kaarevuuden laskentaan
$1/r$	3,63312E-05 1/mm	0,000102564	$1/r = K_r \cdot K_\phi \cdot 1/r_0$
c	8		(4) Vakiopoikkileikkaukselle käytetään normaalisti arvoa $c = 10 (\approx \pi^2)$. Jos ensimmäisen kertaluvun laskennan momentti on vakio, on syytä valita pienempi arvo (8 on alaraja, joka vastaa vakiosuuruista kokonaismomenttia).
e_2	40,87263066 mm	115,3846154	
M_2	3,64556078 kNm	10,29152324	$M_2 = N_{Ed} e_2$
M_{Ed}	6,321356823 kNm	12,96731929	$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2$ Laskettu BY202 mukaisesti, koska EN 1992-1-1 laskenta oletti raudoituksen olevan symmetrinen